

Reciclagem total de misturas betuminosas usando óleo alimentar usado como rejuvenescedor e resíduos de plástico

**Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil**

Autor

Carlos Renato Ramos Rodrigues

Orientadores

Luís Guilherme de Picado Santos

Professor do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos
Instituto Superior Técnico

Silvino Dias Capitão

Professor do Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, outubro, 2019

*“Há três caminhos para o fracasso: Não ensinar o que se sabe,
não praticar o que se ensina e não perguntar o que se ignora.”*

Beda, monge inglês séc. VIII

Agradecimentos

A concretização desta dissertação representa uma nova etapa na vida. Envolveu muito trabalho individual. Horas de pesquisas, de ensaios laboratoriais e de interpretação e tratamento de resultados. Mas também envolveu direta e indiretamente outras pessoas. Por esse motivo, expresso aqui os meus sinceros agradecimentos.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Silvino Capitão e ao Professor Doutor Luís Picado dos Santos, pela partilha do saber científico, por todo o apoio e orientação prestado e por estarem sempre disponíveis para esclarecimentos.

A Mariana da Fonseca, por ter facultado os dados do seu trabalho de investigação na utilização de plásticos recuperados em misturas betuminosas.

Ao meu amigo e colega António Amaral, técnico do ISEC, pela ajuda prestada nos trabalhos laboratoriais e a Elisabete Arede, assistente operacional do ISEC. Ao Celestino, técnico do Laboratório de Vias de Comunicação, do Departamento de Engenharia Civil, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Ao João Crucho e ao Rui Garcia, do Instituto Superior Técnico, pela ajuda e pelos aconselhamentos e esclarecimentos de dúvidas.

Para a realização deste trabalho foi necessário material fornecido por várias empresas. Agradeço desde à Ambiente – Recuperação de Materiais Plásticos, SA, pelo fornecimento do PEBD e à JJR Construções SA, na pessoa da engenheira Rosa Mendes, pelo fornecimento da MBR e do agregado novo. Agradeço também à engenheira Filipa Gomes, da Contec SA, pelo fornecimento do betume utilizado.

Por último, agradeço à minha esposa e ao meu filho pelo incentivo e apoio dado neste trabalho.

A todos, muito obrigado.

Carlos Renato Ramos Rodrigues

Coimbra, outubro de 2019

Resumo

Nas últimas décadas, com as crescentes preocupações ambientais, as sociedades modernas e a indústria têm modificado os seus hábitos de consumo, a gestão dos resíduos e a eficiência na produção de bens e serviços. Reciclar e reutilizar materiais tornou-se imperativo, de forma a caminhar-se para uma economia circular e sustentável.

A indústria de pavimentação tem apostado cada vez mais em soluções mais amigas do ambiente, visando diminuir a sua pegada ecológica. A produção de misturas betuminosas recuperadas (MBR), com a incorporação de altas taxas de material fresado é disso um exemplo.

Este trabalho apresenta um estudo laboratorial, no qual se analisa o desempenho de duas misturas betuminosas utilizando três tipos de resíduos: material betuminoso fresado de pavimentos, óleo alimentar usado (OAU) e um subproduto plástico, o polietileno de baixa densidade (PEBD) proveniente de resíduos sólidos urbanos.

Uma das misturas (100MBR) compreendeu a utilização integral de MBR à qual se adicionou 18% de OAU como rejuvenescedor, 1% de betume novo e 6% de PEBD como polímero modificador do ligante. A outra mistura (85MBR) consistiu numa variante da composição inicial, tendo-se incorporado 15% de agregado novo e 1,5% de betume.

Os resultados obtidos no desempenho das misturas em estudo foram satisfatórios. As deformações obtidas no ensaio de compressão de Marshall estão abaixo de 4 mm, valor este considerado como o limite aceitável nos cadernos de encargos da administração rodoviária portuguesa. O comportamento das misturas face à ação da água obteve valores bastante satisfatórios de resistência conservada em tração indireta de 89 % para a mistura de 100MBR e de 107,4% para a mistura 85MBR.

Os módulos de rigidez obtidos a 20°C e para a frequência de 10Hz (que correspondente a uma velocidade de 63 km/h) foram de 4572 MPa e de 2569 MPa, para as misturas 100MBR e 85MBR, respetivamente.

A nível da resistência à fadiga, ambas as misturas apresentaram no estudo valores bastantes satisfatórios, sendo capazes de suportar mais ciclos de cargas que as misturas convencionais utilizadas como referências.

Embora seja necessário prosseguir os estudos, com a análise laboratorial realizada, verificou-se que as misturas estudadas, com incorporação total de MBR, podem considerar-se uma solução económica e viável, particularmente para estradas com tráfego pesado baixo a moderado. As misturas em estudo constituem uma solução de pavimentação orientada pelos princípios da economia circular.

Palavras Chave: Sustentabilidade, economia circular, misturas betuminosas recuperadas, óleo alimentar usado, polietileno de baixa densidade, rejuvenescedores.

Abstract

Over the last decades, with the growing environmental concerns, the modern societies and the industry have been changed their consumption behaviour, the waste management, and the efficiency in the production of goods and services. Recycling and reusing materials has become imperative in order to move towards a circular and sustainable economy.

The road pavement industry is increasingly betting on environmentally friendly solutions, aiming to reduce its ecological footprint. The production of reclaimed asphalt (RA) with the incorporation of high rates of milled material is an example of this.

This monograph presents a laboratory study, which analyses the performance of two bituminous mixtures that use three types of wastes: milled material from pavements, waste cooking oil (WCO) and a plastic by-product, low density polyethylene (LDPE), coming from urban waste.

One of the blends (100MBR) comprised the total use of milled material, to which 18% of WCO, 1% of virgin bitumen and 6% of LDPE as a binder modifier agent were added. The other blend (85MBR) consisted in a variant of the initial composition by incorporating 15% of new aggregate and 1,5% of virgin bitumen.

The performance results obtained and reported for the studied blends were acceptable. The flows obtained in the Marshall test are below 4 mm, which is an acceptable limit within the specifications of the Portuguese road administration. The behaviour of the mixtures in terms of water resistance was acceptable, with a ITSR of 89% for the 100MBR blend and 100, 7% for the 85MBR blend.

The stiffness moduli obtained at 20°C and for the frequency of 10 Hz (that corresponds to a traffic speed of 63 km/h) were of 4572 MPa and 2569 MPa for the blends 100MBR and 85MBR, respectively.

In term of fatigue resistance, both mixtures revealed acceptable values in this analysis, being able to withstand more load cycles then the mixtures used as reference.

Although it's necessary to continue the studies, based on the laboratory analysis carried out, it was verified that the studied blends, with full incorporation of RA, can be considered an economic and feasible solution, particularly for roads with low to moderate traffic. The studied mixtures are a pavement solution oriented by the circular economy principles.

Keywords: Sustainability, circular economy, Reclaimed asphalt (RA), waste cooking oil (WCO), low density polyethylene (LDPE), rejuvenators.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice	xi
Índice de figuras.....	xv
Índice de Quadros	xix
Índice de Quadros dos Anexos	xxi
Abreviaturas.....	xxiii
Simbologia.....	xxv
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Objetivo do trabalho.....	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura da Dissertação	3
2 Estado do conhecimento relativo aos materiais envolvidos no estudo.....	5
2.1 Considerações Gerais	5
2.2 Mistura Betuminosa Recuperada	6
2.2.1 Taxas de reciclagem na utilização de MBR e as centrais de produção	9
2.2.2 Problemas na utilização de MBR.....	13
2.2.3 Betume	16
2.2.4 Rejuvenescedores.....	18
2.3 Óleo Alimentar Usado e Sua Utilização em Misturas Betuminosas.....	21
2.3.1 Óleo alimentar usado	21
2.3.2 Utilização de OAU em Misturas Betuminosas	23
2.4 Resíduos de Plástico e Sua Utilização em Misturas Betuminosas.....	25
2.4.1 Resíduos de plástico.....	25
2.4.2 Utilização de plásticos em misturas betuminosas.....	27
3 Estudo Laboratorial	31
3.1 Considerações iniciais	31
3.2 Caracterização do material utilizado no estudo.....	32
3.2.1 MBR.....	32
3.2.2 Óleo Alimentar Usado	34
3.2.3 Polietileno de Baixa Densidade	34
3.2.4 Betume asfáltico	35

3.3	Primeira fase do estudo laboratorial	35
3.3.1	Fabricação dos provetes e aplicação do Método de Marshall	36
3.3.2	Determinação da Baridade Aparente.....	37
3.3.3	Ensaio de Compressão Marshall	37
3.3.4	Determinação da Baridade Máxima Teórica e da Porosidade.....	39
3.3.5	Determinação da Sensibilidade à Água e da Resistência à Tração Indireta...	40
3.3.6	Estudo da deformação permanente por compressão uniaxial.....	42
3.4	Segunda fase do estudo.....	45
3.4.1	Ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente pelo wheel-tracking 50	
3.4.2	Módulo de rigidez e resistência à fadiga	52
4	Comparação das Características das Misturas em Estudo com as Obtidas em Estudos Similares.....	57
4.1	Considerações Iniciais	57
4.2	Análise dos resultados obtidos.....	57
4.2.1	Estudo Marshall e sensibilidade à água das misturas	57
4.2.2	Estudo da resistência à deformação permanente das misturas	59
4.2.3	Estudo do módulo de rigidez das misturas	61
4.2.4	Estudo da resistência à fadiga das misturas.....	64
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	67
5.1	Conclusões do trabalho desenvolvido.....	67
5.2	Trabalhos futuros	69
	Referências Bibliográficas	71
	Webgrafia	75
	Documentos Normativos	77
	Anexos.....	79
	Anexo A- Propriedades e requisitos mínimos para a MBR e taxas de incorporação.....	81
	Anexo B- Percentagem de betume existente na MBR.....	83
	Anexo C- Relatório Marshall para as misturas 100MBR e 85 MBR.....	85
	Anexo D- Resultados apresentados pelos grupos da mistura 100MBR para o estudo à sensibilidade a água.....	87
	Anexo E- Resultados apresentados pelos grupos da mistura 85MBR para o estudo à sensibilidade a água.....	89
	Anexo F- Relatório gerado pelo software da compressão uniaxial para o provete 1.2V (mistura 100MBR).....	91

Anexo G- Relatório gerado pelo software da compressão uniaxial para o provete 85b (mistura 85MBR).....	93
Anexo H- Dimensões e baridades das vigas produzidas para o estudo.....	95
Anexo I- Resultados do módulo de rigidez e ângulo de fase para a mistura 100MBR...	97
Anexo J- Resultados do módulo de rigidez e ângulo de fase para a mistura 85MBR.....	99
Anexo K- Análise Granulométrica das MBR em estudo após incineração.....	101

Índice de figuras

Figura 1 - Aplicação corrente de MBR em vários países (Adaptado de Antunes et al, 2019).	7
Figura 2– Variação do preço do petróleo bruto no mercado (Liu et al, 2017)	8
Figura 3 - Principais componentes de uma central (adaptado:Federal Aviation Administration “Hot Mix Asphalt Paving Handbook, 2000, part II”)	9
Figura 4– Representação da variação da temperatura no processo que ocorrem nos diferentes tambores (Adaptado: Zhang et al 2019)	11
Figura 5– Aspeto visual de duas misturas betuminosas com MBR (adaptado de Shao et al, 2017)	11
Figura 6-Central convencional adaptada (adaptado Zaumanis et al,2014)	13
Figura 7– Relações volumétricas para diferentes cenários de ligação (adaptado Illinois Center for Transportation, 2009)	14
Figura 8– Hipóteses possíveis para a capacidade de ativação do betume existente no MBR (adaptado Moghaddam et al,2016)	15
Figura 9– Custos dos materiais em misturas betuminosas (adaptado Zaumanis et al,2014)	16
Figura 10 – Comportamento viscoelástico do betume (adaptado de Carvalho, 2018)	17
Figura 11– Representação esquemática da dispersão coloidal do betume (Carvalho, 2018)	17
Figura 12– Índice de envelhecimento (adaptado: Hunter, Robert (2003). Asphalts in road construction. London, Thomas Telford Publishing)	18
Figura 13– Difusão do rejuvenescedor (adaptado de Zaumanis et al, 2018)	20
Figura 14– Produção Mundial por ano de Óleo Alimentar Usado (adaptado de Azahar et al, 2015)	22
Figura 15– Número de postos de recolha de OAU (adaptado de APA)	22
Figura 16-Representação do módulo de rigidez e do ângulo de fase (adaptado de Fernandes, 2018)	24
Figura 17– Representação das leis de fadiga das misturas (adaptado de Fernandes, 2018)	25
Figura 18-Produção de plásticos no mundo (Adaptado de Plastics Europe)	26
Figura 19- Produção de resíduos de plásticos na UE em 2015 (Adaptado de Plastics Europe)	27
Figura 20– Variação da rigidez e das propriedades reológicas do betume (Adaptado de Naskar et al, 2010)	28
Figura 21– Representação gráfica da lei da fadiga (adaptado de Fonseca et al, 2019)	29
Figura 22– Esquema do estudo laboratorial	32
Figura 23- Curvas granulométricas das misturas 100MBR e 85 MBR em estudo	33
Figura 24– Material fresado utilizado no estudo	33
Figura 25– Processo de filtragem do OAU: a) OAU, b) filtragem com coador, c) filtragem com papel de filtro, d) produto final	34
Figura 26– Triagem e trituração dos materiais plásticos de RSU na empresa Ambiente – Recuperação de Materiais Plásticos, SA	34

Figura 27– Constituintes da mistura 85MBR: a) betume novo, b) OAU, c) MBR, d) PEBD, e) agregado novo 4/16.....	35
Figura 28– Produção da mistura: a) misturadora, b) adição do OAU, c) adição do PEBD	36
Figura 29– Provetes Marshall da mistura 100MBR.....	37
Figura 30– Ensaio de compressão Marshall: a) provete durante o ensaio b) gráfico gerado da variação da estabilidade com a deformação, c) provetes após o ensaio.....	38
Figura 31– Determinação da baridade máxima teórica: a) mistura desagregada, b) mistura submetida ao vácuo no picnómetro, c) PEBD que não se fundiu no processo de mistura.....	39
Figura 32– Estudo da sensibilidade à água: a) Provetes submetidos a pressão negativa, b) os dois grupos acondicionados à temperatura de ensaio 25°C, c) ensaio de tração indireta.....	41
Figura 33– ITS a) Provetes após ensaio à tração indireta, b) visível a quebra dos agregados.....	41
Figura 34–a) Martelo de vibro-compressão, b) Fabricação do provete; c) Provetes obtidos	42
Figura 35– Compressão Uniaxial: a) Sistema de aquisição de dados; b) Estrutura de carga; c) LVDTs.....	43
Figura 36: Representação gráfica da extensão axial permanente acumulada e da deformação permanente	44
Figura 37- Comportamento reológico do material: a) viscoelástico; b) elástico (adaptado: Hunter, Robert (2003). Asphalts in road construction. London, Thomas Telford Publishing)	45
Figura 38-Comportamento viscoelástico do material (adaptado: Hunter, Robert (2003). Asphalts in road construction. London, Thomas Telford Publishing)	46
Figura 39- Representação das componentes do módulo complexo	47
Figura 40- Misturadora utilizada no processo de fabricação das lajes: a) misturadora; b) eixo da misturadora.....	47
Figura 41-Processo de fabricação da mistura.....	48
Figura 42-Equipamento Roller Compactor	49
Figura 43-Laje no molde, após o fim do processo de compactação.....	49
Figura 44-Processo de serragem das lajes (esquerda) e as vigas obtidas (direita)	49
Figura 45- Vigas das misturas 100MBR e 85MBR	50
Figura 46– Equipamento Wheel-tracking	50
Figura 47– Lajes após o ensaio Wheel-Tracking (100MBR: 100.1, 100.2; 85MBR: 85.3, 85.4)	51
Figura 48- Resultados do wheel-tracking para as misturas 100MBR e 85MBR	52
Figura 49 –Equipamento four-point-bending.....	52
Figura 50: Baridades aparentes das vigas.....	53
Figura 51 - Representação do módulo de rigidez e do ângulo de fase para as misturas em estudo	54

Figura 52 – Leis da fadiga para as misturas em estudo, 100MBR e 85MBR.....	56
Figura 53-Parâmetros obtidos no ensaio de Wheel-Tracking para as misturas em comparação.....	59
Figura 54: Valores comparativos da deformação permanente para as misturas em comparação.....	60
Figura 55: Comparação do ângulo de fase e do módulo de deformabilidade.....	62
Figura 56-Relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase das misturas em estudo..	63
Figura 57- Comparação das Leis de fadiga para as misturas em estudo	65

Índice de Quadros

Quadro 1: Cálculo da energia consumida na produção de MBQ com introdução de MBR (Gillespie, 2012)	7
Quadro 2: Taxa de incorporação de MBR em função das temperaturas dos materiais (adaptado: Yu et al, 2017)	12
Quadro 3: Asfaltenos e frações constituintes dos maltenos (adaptado de Moghaddam et al, 2016)	18
Quadro 4: Local da aplicação do rejuvenescedor em Central (adaptado de Zaumanis et al, 2018)	19
Quadro 5: Efeito de diferentes tipos de rejuvenescedores (adaptado de Moghaddam et al 2016)	21
Quadro 6: Componentes químicos do betume virgem e do betume rejuvenescido com OAU (adaptado Zargar et al, 2012)	23
Quadro 7: Composição da mistura AC 14 surf 35/50 da JJR Construções SA	32
Quadro 8- Características do betume asfáltico 35/50	35
Quadro 9: Valores do estudo Marshall	39
Quadro 10: Resumo dos resultados do estudo Marshall para as duas misturas (valores médios)	40
Quadro 11: Resumo dos resultados do estudo da sensibilidade à água	41
Quadro 12: Resultados da compressão uniaxial	44
Quadro 13: Resultados obtidos no ensaio wheel-tracking para as duas misturas	51
Quadro 14: Valores médios dos resultados do wheel-tracking para as duas misturas	52
Quadro 15 - Valores obtidos no estudo à fadiga para as vigas ensaiadas	55
Quadro 16- Valores de ε_6 determinados para as duas misturas em estudo	55
Quadro 17- Composição das misturas betuminosas em estudo	57
Quadro 18: Resumo comparativo do estudo Marshall e da sensibilidade à água	58
Quadro 19- Representação de baridades e porosidades para as misturas, consoante o método de fabricação dos provetes	61
Quadro 20- Valores de ε_6 obtidos para as misturas no estudo à fadiga	64

Índice de Quadros dos Anexos

Quadro I- Propriedades e requisitos mínimos de conformidade das misturas betuminosas recuperadas.....	81
Quadro II- Campo de aplicação e taxas máximas de incorporação de misturas betuminosas recuperadas no fabrico de misturas recicladas a quente.....	81
Quadro III- Resultados Marshall dos provetes da mistura 100MBR.....	85
Quadro IV- Resultados Marshall dos provetes da mistura 85MBR.....	85

Abreviaturas

- 4PB – Four-Point-Bending (Flexão em 4 pontos)
ABS - Acrilonitrila-butadieno-estireno
AC - Asphalt Concrete
APA - Agência Portuguesa do Ambiente
CEE - Comunidade Económica Europeia
CEN - Comité Europeu de Normalização
EAPA - European Asphalt Pavement Association
EN - European Standard
EPA - Environmental Protection Agency
EUA - Estados Unidos da América
EVA - Acetato-vinilo de etileno
fc - Taxa de deformação
FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
I&D - Pesquisa e Desenvolvimento
ISEC - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
IST - Instituto Superior Técnico
ITS - Indirect Tensile Strength (Resistência à Tração Indireta)
ITSR - Indirect Tensile Strength Ratio (Resistência Conservada em Tração Indireta)
LDPE - Low Density Polyethylene
LVDT - Linear Variable Differential Transformer (Transformador Diferencial Variável Linear)
LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MBQ - Misturas Betuminosas a Quente
MBR - Mistura Betuminosa Recuperada
MBT - Misturas Betuminosas Temperadas
MIT - Massachusetts Institute of Technology
NAPA - National Asphalt Pavement Association
NP - Norma Portuguesa
OAU - Óleo Alimentar Usado
OMU - Óleo de Motor Usado
PE - Polietileno
PEAD - Polietileno de Alta Densidade
PEBD - Polietileno de Baixa Densidade
PET - Politereftalato de Etileno
PMB - Polymer modified binders
PP – Polipropileno
PRD_{air} - Valor proporcional da rodeira em relação com a altura do provete
PRN2000 - Plano Rodoviário Nacional 2000
PS - Poliestireno

PVC - Policloreto de vinilo

RA - Reclaimed Asphalt

RAP - Reclaimed Asphalt Pavement

RD_{air} – Profundidade de rodeira no final do ensaio

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SA - Sociedade Anomia

SBR - Borracha de estireno-butadieno

SBS - Estireno-butadieno-estireno

SMA - Stone Mastic Asphalt

UE - União Europeia

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura)

VMA - Voids in the mineral aggregate (Vazios da mistura de agregados)

WCO - Waste Cooking Oil

WTS_{air} - Taxa de deformação média

Simbologia

Φ - Ângulo de fase

E^* - Módulo complexo de corte

E – Módulo de elasticidade (Módulo de Young)

$|E^*|$ - Módulo de rigidez.

S_m – Módulo de rigidez

$E^*/\sin \Phi$ - Fator de resistência à deformação

$E^*.\sin \Phi$ - Fator de resistência ao fendilhamento

η - Viscosidade dinâmica

η_c - viscosidade cinemática

ρ_{ssd} - Baridade aparente do provete saturado com a superfície seca

ρ_w - Massa volúmica da água à temperatura do ensaio

ρ_{mv} - Baridade máxima teórica

V_{mv} - Porosidade

σ - Tensão

ε – Extensão

ε_N – Extensão axial permanente acumulada após N ciclos

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

A rede rodoviária é um elemento fundamental para o seu desenvolvimento económico e social de qualquer nação moderna. É pela rede de estradas que circula grande parte das mercadorias e serviços que dinamizam a economia de um país.

Com a adesão de Portugal à Comunidade Económica Europeia (CEE), foi necessário a revisão da rede rodoviária nacional, com o objeto de melhorar as condições e capacidades da nossa rede rodoviária devido ao crescente aumento do tráfego rodoviário que se verificou após a adesão do país à CEE. Assim sendo, a rede rodoviária nacional, foi revista em 1998, no designado Plano Rodoviário Nacional 2000 (PRN2000), possuindo atualmente, de acordo com a informação da Infraestruturas de Portugal, uma extensão de aproximadamente 17874 km (fonte: Infraestruturas de Portugal : <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/rede/rodoviaria>).

Maioritariamente a nossa rede rodoviária é constituída por pavimentos rodoviários flexíveis, sendo o betume asfáltico o material aglutinador deste tipo de pavimentos. O betume asfáltico é um resíduo do processo de destilação do petróleo bruto. Nos últimos anos o preço do petróleo tem vindo a subir nos mercados internacionais, devido a um aumento da procura. Como consequência, o aumento do preço dos derivados do petróleo, tais como o betume asfáltico, tem subido também.

Grande parte da nossa rede rodoviária, criada no âmbito do PRN2000, apesar de alguma manutenção realizada ao longo destes anos, está a necessitar de intervenções mais profundas, o que conduzirá a crescentes volumes de misturas betuminosas recuperadas (MBR), provenientes de antigos pavimentos rodoviários.

As preocupações ambientais e a sustentabilidade, cada vez mais em voga, e a importância que a reciclagem assume nesse contexto, associadas aos objetivos da União Europeia de caminhar para uma economia circular e hipocarbónica levam a que as empresas e os cidadãos contribuam para políticas mais ecológicas e sustentáveis. A indústria de pavimentação tem acompanhado este novo paradigma, apostando na reutilização de materiais, como as MBR, apostando também em produzir misturas onde são aplicadas menores temperaturas para aquecer os materiais constituintes, as designadas misturas betuminosas temperadas, o que reduz o consumo de energia e a emissão de gases para a atmosfera.

Apesar de um crescente aumento na utilização de MBR, existe muito ainda por fazer. Uma parte considerável das MBR acaba por não ser reutilizada, sendo, por vezes, depositada em aterros. Além do impacto ambiental que a deposição indevida acarreta, desperdiçam-se grandes quantidades de agregados e betume existentes neste material que poderiam ser reutilizadas.

A falta de consciência ambiental, os equipamentos tradicionais existentes nas centrais, aptos para trabalhar com materiais novos, e o receio de fracos desempenhos do produto final, têm representado alguns entraves a um uso mais amplo das MBR e de outros subprodutos em misturas betuminosas.

Este trabalho surge como mais um contributo para o conhecimento das propriedades de misturas betuminosas que incorporam resíduos, tentando melhorar algumas propriedades do material final, ao mesmo tempo que se valorizam os resíduos utilizados.

1.2 Objetivo do trabalho

Este trabalho tem como foco contribuir para validar em laboratório, do ponto de vista técnico, a reutilização de três resíduos no fabrico de misturas betuminosas para pavimentação rodoviária: MBR, originárias de um pavimento rodoviário antigo; óleo alimentar usado (OAU), de origem vegetal com a função de rejuvenescedor do betume envelhecido; polietileno de baixa densidade (PEBD), proveniente do pré-tratamento dos resíduos sólidos urbanos, como polímero modificador do betume.

Este trabalho foi desenvolvido no seguimento de outro realizado por Fernandes (2018), no Instituto Superior Técnico (IST), no âmbito de uma dissertação de mestrado. Aquele autor produziu uma mistura utilizando na sua totalidade MBR, adicionando à mistura 18% de OAU como rejuvenescedor e 1% de betume novo. De uma forma global, a mistura betuminosa estudada atingiu características bastante satisfatórias, embora com um comportamento sofrível no que diz respeito à resistência à deformação permanente. Por essa razão, pretendia-se com este trabalho avaliar as oportunidades de melhoria do comportamento, introduzindo algumas alterações na composição inicialmente estudada. Assim, este objetivo centrou-se na correção da granulometria da MBR, através da adição de 15% de agregado grosso novo, e/ou na utilização de um polímero – o PEBD – como agente modificador do ligante.

1.3 Metodologia

Este estudo consistiu na produção e análise das propriedades de duas misturas, ambas fabricadas com a mesma MBR, igual percentagem de OAU e o mesmo betume novo que Fernandes (2018) utilizou no seu estudo. Uma mistura incorporou 100% de MBR (100MBR) e outra 85% de MBR, tendo sido adicionado 15% de agregado novo (85MBR). Além da adição de OAU nas duas misturas em estudo, foi também adicionado PEBD, com a função de modificador do betume. Este subproduto foi utilizado como substituto de 6% da massa de betume, tendo-se seguido genericamente o procedimento realizado no estudo de Fonseca (2018).

Os trabalhos foram desenvolvidos em dois locais distintos. Uma primeira fase do trabalho foi realizada no Laboratório de Pavimentos Rodoviários, no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), e a segunda fase do estudo foi realizada no Laboratório de Vias de Comunicação e Transporte, do Instituto Superior Técnico, em Lisboa.

Para o estudo experimental das misturas determinaram-se as propriedades decorrentes da aplicação do método de Marshall, tendo-se avaliado também a resistência à ação da água, a rigidez, a resistência à fadiga e à deformação permanente. O programa de caracterização volumétrica e mecânica das misturas estudadas exigiu a produção de provetes de diferentes formas e dimensões, designadamente lajetas, provetes prismáticos e provetes cilíndricos, os quais foram ensaiados através de vários tipos de equipamentos e modos operatórios. A caracterização mecânica foi realizada em ensaios de flexão com aplicação de cargas repetidas, ensaios de pista de laboratório, ensaios de tração indireta e ensaios de compressão uniaxial com aplicação de cargas repetidas.

1.4 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se dividido em cinco capítulos e 11 anexos. O primeiro capítulo apresenta um enquadramento geral do tema, a metodologia utilizada e a organização do documento.

No capítulo 2 vem representada a revisão da literatura, na qual se descrevem os estudos realizados por diversos autores, ao longo de vários anos, sobre a temática do uso de MBR, a taxa de introdução de MBR em misturas betuminosas, a utilização de OAU e outros produtos como rejuvenescedores do betume envelhecido e a introdução em misturas betuminosas de vários tipos de resíduos de plástico. Além disso, referem-se as dificuldades inerentes ao uso de altas taxas de MBR em misturas, o problema do comportamento do betume envelhecido existente na MBR, sendo também apresentados os tipos de centrais de produção de misturas betuminosas existentes e as suas capacidades para produzir altas taxas de introdução de MBR.

O capítulo 3 é dedicado ao estudo laboratorial desenvolvido na presente dissertação, sendo apresentados as metodologias de trabalho e os ensaios realizados ao longo do estudo para as duas misturas, assim como os resultados obtidos.

No capítulo 4 faz-se a discussão dos resultados, analisando-se as propriedades medidas para as duas misturas, ao mesmo tempo que se compara os desempenhos obtidos com os observados, designadamente por Fernandes (2018), por Fonseca (2018) e por Almeida et al. (2019) nos trabalhos que realizaram anteriormente, incorporando OAU ou PEBD em misturas betuminosas.

O capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo e as recomendações para futuros trabalhos a serem desenvolvidos.

.

2 Estado do conhecimento relativo aos materiais envolvidos no estudo

2.1 Considerações Gerais

Estado do conhecimento relativo aos materiais envolvidos no estudo

Vivemos num planeta com recursos limitados e com uma população em constante crescimento. Em 1960 a população humana era de 3 mil milhões de habitantes, em 2010 ultrapassou os 7 mil milhões e as previsões para 2040 são de mais de 9 mil milhões de seres humanos que necessitarão de recursos, aumentando assim o impacto ambiental.

As sociedades modernas giram em torno de uma complexa rede de consumo destinada a satisfazer as suas necessidades, desde hábitos mais básicos, como a alimentação, a higiene e simples objetos de uso diário até aos transportes. Para satisfazer estas necessidades de consumo, a procura por recursos naturais continua em crescimento, criando enormes pressões sobre o meio ambiente. A degradação dos ecossistemas provocada pela procura de novos recursos leva à desflorestação, à degradação dos solos e da qualidade da água. O crescente nível de produção da indústria contribui também para a quantidade de gases com efeito de estufa libertados e para as alterações climáticas.

As circunstâncias de utilização dos recursos tendem a levar a um aumento do custo das matérias-primas e energias, ao crescente aumento de volumes de resíduos das atividades industriais e domésticas e a alterações climáticas, o que despertou nas sociedades e nos estados a perceção de que era vital mudar este paradigma.

Nos últimos anos, gerir os desperdícios das atividades humanas e alterar os hábitos consumistas tornou-se fundamental, assim como a necessidade de reciclagem e reutilização dos materiais. Tanto o consumidor final como os setores industriais tiveram que alterar os seus hábitos de consumo e de produção por razões de consciência ecológica ou por imposição legislativa. Os avanços tecnológicos permitiram uma melhor gestão dos resíduos sólidos urbanos e industriais, facilitando a sua reutilização e diminuindo, assim, o volume de material enviado para aterro, por força da reutilização dos resíduos como matéria-prima para novos produtos.

A indústria de pavimentação não podia ficar afastada desta nova realidade e desafio, pelo que teve que se adaptar para se tornar mais sustentável e eficiente. O processo de fabricação de uma mistura betuminosa implica um grande consumo de energia, de matérias-primas e de libertação de emissões para a atmosfera. Podemos, assim, considerar que a pegada ecológica da indústria de pavimentação é considerável. Para contrariar esta situação, a indústria iniciou a introdução de novos materiais e subprodutos nas misturas betuminosas de modo a melhorar o seu desempenho ambiental.

O grande desafio poderá passar pela reutilização em larga escala de misturas betuminosas recuperadas (MBR). O entrave à utilização generalizada deste tipo de material passa por mentalidades instaladas pouco abertas à inovação, problemas tecnológicos e legislativos. Para ultrapassar os obstáculos serão necessários vários tipos de contributos, tais como consolidar e implementar os estudos e investigações realizados nas últimas décadas em todo o mundo, sobre a utilização com êxito de percentagens elevadas de MBR em misturas betuminosas para pavimentação.

2.2 Mistura Betuminosa Recuperada

Quando um pavimento rodoviário chega a um estado de degradação que já não cumpre os requisitos de segurança e comodidade, quer por ter chegado ao fim do tempo útil de vida para o qual foi dimensionado, quer por falta de manutenção, necessita de ser reabilitado ou substituído. Quando a degradação é considerável a solução técnica passa pela remoção das camadas betuminosas danificadas e pela aplicação de novas camadas de misturas betuminosas.

O processo de remoção das camadas do pavimento é realizado por fresagem que consiste na utilização de um equipamento mecânico que desagrega as camadas betuminosas através de movimentos rotativos contínuos de um tambor, munido de dentes salientes, e a subsequente recolha do material fresado, habitualmente designado por mistura betuminosa recuperada (MBR). A MBR é utilizada em conjunto com novos agregados e betume para produzir novas misturas betuminosas. Este processo pode ocorrer no próprio local da obra (reciclagem *in situ*) ou em central, exigindo este último processo o transporte do material para o estaleiro onde será incorporado no processo de fabrico.

Antes da aplicação de MBR é necessário um estudo adequado das suas características e do material que a compõe. Uma MBR pode ser aplicada nas diferentes camadas que podem constituir o pavimento rodoviário: camadas de base, regularização, ligação e desgaste. A experiência mostra que uma MBR convencional pode ser incorporada como constituinte de misturas betuminosas fabricadas a quente (MBQ) (Picado-Santos et al, 2010), temperadas (MBT) (Martinho et al, 2017; Picado et al, 2010), semitemperadas (Lizárraga et al, 2018) e a frio (Valentin et al, 2016).

As regras para o uso de MBR variam consoante as administrações rodoviárias e os países. Por exemplo, nos EUA, as regras variam de estado para estado, existindo estados que só permitem a incorporação de MBR até 20% enquanto outros permitem a utilização de percentagens mais elevadas (US Department of Transportation, Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, 2011).

No espaço europeu a incorporação da MBR obedece à norma EN 13108-8 (2011). O cenário de aplicação de MBR varia de país para país. Em países como a Áustria e a Alemanha, por exemplo, não é permitido o seu uso em camadas finas nem em misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), e no Reino Unido a sua utilização não é permitida em mais de 10 % em camadas superficiais (Antunes et al, 2019). Na figura 1 representa-se graficamente a distribuição dos diferentes usos de MBR em vários países.

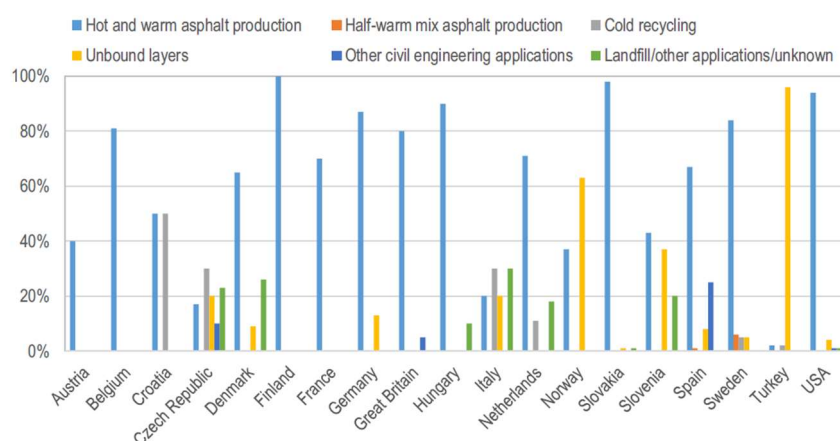


Figura 1 - Aplicação corrente de MBR em vários países (Adaptado de Antunes et al, 2019).

Em Portugal, o uso de MBR é permitido nas diferentes camadas de pavimentos, estando a taxa de incorporação dependente dos meios técnicos das centrais de produção da mistura betuminosa e da camada em que vai ser aplicado. Os agregados que constituem a MBR devem obedecer ao estabelecido no caderno de encargo da obra e a dimensão máxima das partículas não deve exceder 32 mm (LNEC, E 472-2009). No Anexo A apresentam-se de forma mais detalhada as propriedades e os requisitos mínimos para uma MBR, e as taxas máximas de incorporação deste material (de 10 a 50%), recomendados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil para MBQ.

Parte considerável dos pavimentos em Portugal, construídos no âmbito do chamado Plano Rodoviário 2000, aproximam-se do fim de vida útil, o que tende a acarretar um grande investimento para a conservação e reabilitação destes pavimentos, por um lado, e também um elevado volume de MBR que seria muito importante valorizar, quer a nível económico quer a nível ambiental, por outro. Mazzoni et al (2018), citam Karlsson e Isacson, em que estes autores defendem que as MBR não devem ser consideradas como lixo ou desperdício, pois existem nelas muito potencial enquanto matéria-prima valorizável em novas misturas, tanto em termos de agregados como de betume.

Além do reaproveitamento dos constituintes das MBR, o uso deste material na produção de misturas betuminosas leva geralmente a uma redução do consumo de energia associado à produção de matéria-prima e, com isso, a uma diminuição dos custos de produção (Liu et al., 2017). No quadro 1 indicam-se, a partir de Gillespie (2012), a energia consumida na produção de MBQ com e sem MBR.

Quadro 1: Cálculo da energia consumida na produção de MBQ com introdução de MBR (Gillespie, 2012)

Mistura Final Temperatura/Percentagem de betume	Sem MBR (kWh)	Processo / percentagem de MBR	Com MBR (kWh)
138°C/5%	81,52	A frio/30%	85,87
170°C/3%	73,73	Pré-aquecido/60%	74,00
149°C/5%	84,84	Paralelo/50%	66,02
149°C/5%	84,84	Contra fluxo/50%	81,02
149°C/5%	84,84	Duplo tambor/50%	67,69

A primeira utilização de uma MBR foi referida em 1915 (Moghaddam et al, 2016). Contudo, foram as crises petrolíferas dos anos setenta do século passado que originaram um considerável aumento do preço do petróleo bruto e que conduziram a uma crescente utilização de MBR, principalmente nos EUA. Devido a um aumento da procura, o preço do petróleo continua a subir nos dias de hoje (figura 2).

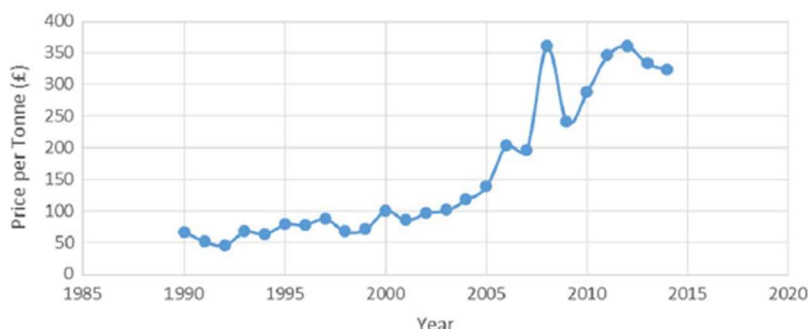


Figura 2– Variação do preço do petróleo bruto no mercado (Liu et al, 2017)

As centrais correntes de produção de misturas betuminosas existentes no mercado não estão tecnologicamente preparadas para trabalhar com valores elevados de incorporação de MBR. Segundo Zaumanis et al. (2014), as centrais convencionais apenas conseguem incorporar mais de 50 % de material fresado em condições específicas. Contudo, isso implica o sobreaquecimento dos materiais constituintes, o que origina um maior consumo de energia e aumenta os riscos de emissão de fumo azul resultante da inflamação do betume existente na MBR, com o consequente risco de degradar o betume envelhecido. Assim, afigura-se desejável que se caminhe no sentido de atender à necessidade futura de maiores níveis de incorporação de MBR, atualizando as centrais.

Apesar das dificuldades, o uso de MBR tem vindo a aumentar. Por exemplo, nos EUA, segundo a *National Asphalt Pavement Association* (NAPA), de 2009 a 2016, houve um aumento de utilização de MBR de 79,6 milhões de toneladas. A média percentual do uso de MBR foi de 15,6 % em 2009 e de 20,5 % em 2016, o que corresponde a uma poupança de 2 mil milhões de dólares (Zhang et al, 2019). Na Europa, segundo os dados da *European Asphalt Pavement Association* (EAPA), 47% das MBR produzidas foram utilizadas em novas misturas betuminosas, embora 22 milhões de toneladas daquele material tenham ficado armazenados ou tenham tido outros fins (Zaumanis et al, 2014).

Em Portugal, a primeira utilização de uma MBR foi em 1999/2000, durante a reabilitação da EN 105, entre Travagem e Santo Tirso. Estava prevista a utilização de 40% de material fresado, mas devido a fatores de produtividade na central contínua, a taxa de incorporação de MBR foi de 30% (Neves et al, 2017).

A capacidade de ativação do betume envelhecido existente na MBR é um fator a ter em conta, pois este pode ser totalmente ativado ou não durante a fase de mistura, influenciando assim o desempenho da mistura.

2.2.1 Taxas de reciclagem na utilização de MBR e as centrais de produção

De um modo geral, podemos considerar que existem dois tipos de centrais de produção de misturas betuminosas: as centrais contínuas e as descontínuas. Na figura 3 apresentam-se os principais componentes de uma central.

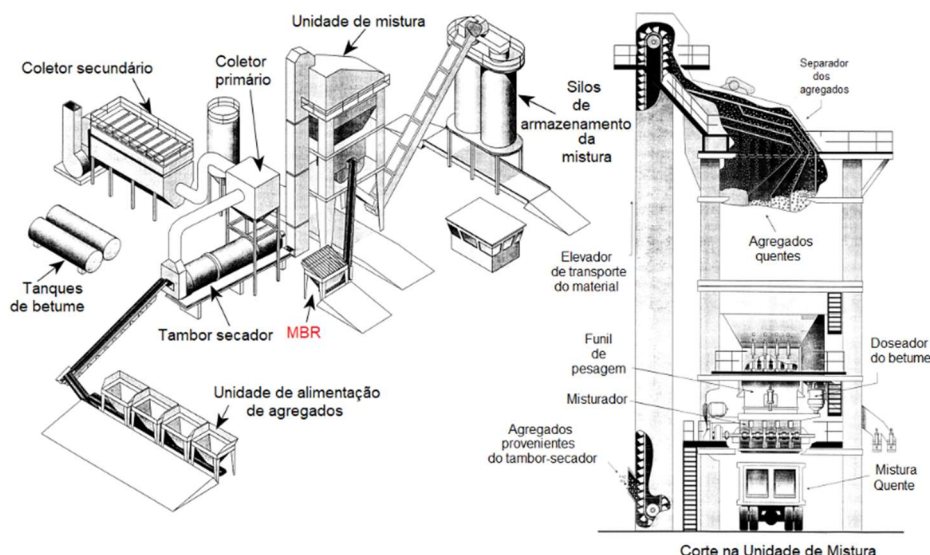


Figura 3 - Principais componentes de uma central (adaptado: Federal Aviation Administration "Hot Mix Asphalt Paving Handbook, 2000, part II")

Nas centrais descontínuas os agregados aquecidos são misturados com o betume realizando-se assim uma "fornada", sendo depois essa mistura acondicionada em silos ou depositadas em camiões para ser transportada para a obra. Terminada essa "fornada" a central inicia outra. Nas centrais contínuas o processo é semelhante, mas não existe interrupção, a mistura é armazenada em silos e destes seguem para os camiões (Neves, J. et al 2017; Santos, L. et al 2002).

O elemento base de uma central é o tambor-secador. Nas centrais contínuas este tambor é também, em geral, misturador. Os agregados que se encontram à temperatura ambiente nas tremonhas de alimentação de agregados são doseados e transportados, através de um tapete rolante, para o tambor-secador, onde são secos e aquecidos à temperatura desejada para a mistura. A capacidade de produção de uma central é regulada pela velocidade do tapete. Após secos e aquecidos os agregados, junta-se o ligante. Quando a unidade de mistura é autónoma, os agregados são crivados, sendo separados em frações e armazenados em silos a quente e, a partir destes, doseados e introduzidos no misturador onde se adiciona o ligante.

Existem centrais contínuas mais simples, nas quais a secagem, o aquecimento e a mistura realizam-se no tambor, designado tambor-secador-misturador. O modo de funcionamento é diferente, os agregados são doseados e introduzidos a frio no tambor-secador-misturador que tem um sistema de aquecimento, geralmente um queimador, onde os agregados circulam na direção da corrente dos gases quentes produzidos pela ação do queimador. Na primeira parte do tambor, realiza-se a secagem dos agregados e o seu aquecimento, o betume entra a meio do tambor e na parte final realiza-se a mistura.

A taxa de utilização de MBR nas centrais está relacionada com a capacidade ou não da central em aquecer perviamente a MBR para a produção. Com a MBR aquecida previamente, aumenta o rendimento de produção.

Liu et al (2017) indicam três métodos de introdução da MBR no processo: pré-aquecer a MBR separadamente, adicionar a MBR a frio na mistura, e aquecer e secar a MBR em conjunto com os agregados.

No primeiro método a MBR é aquecida e seca num tambor (120-140°C). Num segundo tambor são secos e sobreaquecidos os agregados (220-240°C). Este sobreaquecimento destina-se a garantir uma temperatura ideal para realizar a mistura, a cerca de 170°C. Este procedimento permite a utilização de 30 a 80% de MBR.

No método em que se adiciona a MBR a frio, os agregados novos são sobreaquecidos a uma temperatura que não deve exceder 260°C. Este método provoca uma diminuição do tempo de vida útil do equipamento de secagem e aquecimento devido às elevadas temperaturas exigidas, sendo a taxa de utilização de MBR de até 35%.

O último método indicado por Liu et al (2017), é mais utilizado em centrais contínuas. Consiste em secar e aquecer o conjunto dos materiais num tambor, sendo os materiais introduzidos de formas distintas. Este processo pode realizar-se de três formas diferentes consoante o tipo de tambor: em fluxos paralelos, em contrafluxo ou em duplo tambor. No sistema de fluxos paralelos, os gases da exaustão e os materiais movem-se no mesmo sentido. Os agregados são aquecidos, a MBR entra a meio do tambor, evitando assim sujeitar-se a temperaturas excessivas e baixando a temperatura dos agregados e da mistura. O betume é injetado na parte final do tambor e realiza-se a mistura.

O tambor em contrafluxo os gases de exaustão provocado pelo queimador seguem no sentido oposto ao do sentido de movimento da MBR. Tanto a MBR como o betume novo, não estão em contacto direto com as chamas do queimador. Tecnicamente este sistema é mais amigo do ambiente, pois conduz ao uso de menores temperaturas durante o processo.

O sistema de duplo tambor é o mais avançado para o uso de MBR (Liu et al, 2017). Este sistema combina o processo de secagem, aquecimento e mistura. Existe um tambor que funciona em contrafluxo rodeado por um segundo tambor. Os agregados novos são secos e aquecidos num tambor e a MBR em conjunto com o betume são processados no segundo tambor. Os agregados novos são sobreaquecidos a temperaturas superiores a 300°C quando se utiliza uma taxa de MBR de 50%, atingindo a mistura final uma temperatura de cerca de 150°C.

Na figura 4 representam-se em esquema diferentes tipos de tambores e a variação da temperatura nas várias fases do processo de mistura. A figura 5 representa uma mistura realizada num equipamento convencional e outra realizada num sistema de duplo tambor, sendo bem visível que no sistema de duplo tambor a mistura se encontra mais homogénea, com os agregados bem envolvidos pelo betume.

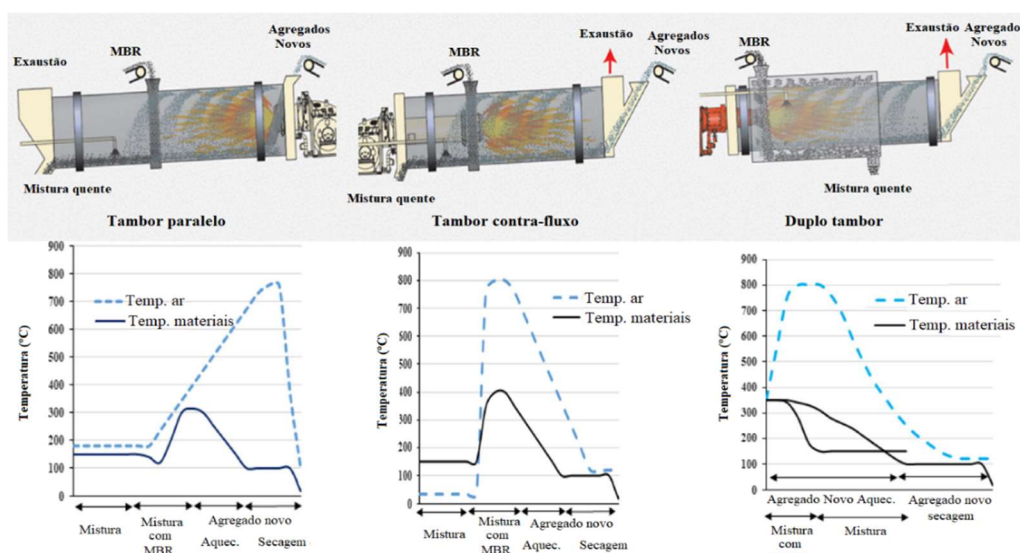


Figura 4– Representação da variação da temperatura no processo que ocorrem nos diferentes tambores (Adaptado: Zhang et al 2019)

A possibilidade de aquecimento do material reciclado tem influência na sua taxa de incorporação. Se a MBR for introduzida a frio a taxa de utilização fica entre 35% e 40%. Aquecendo previamente o material pode incorporar-se na mistura 65% a 70% de MBR, embora isso acarrete um decréscimo no rendimento da central, na ordem de 20 %. Fonseca et al. (2013) referem a necessidade de adaptar as centrais existentes, para poder utilizar-se maiores volumes de MBR. Aqueles autores defendem também a separação das frações finas e grossas do material fresado, introduzindo-as em fases distintas no processo de mistura (Fonseca et al, 2013).

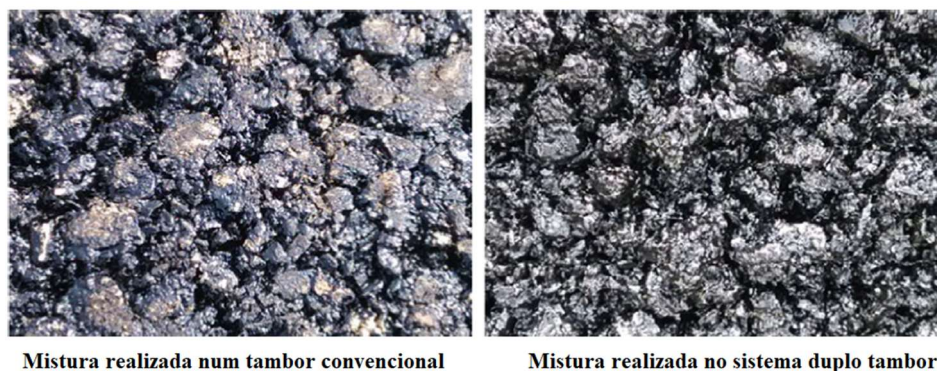


Figura 5– Aspeto visual de duas misturas betuminosas com MBR (adaptado de Shao et al, 2017)

A temperatura final obtida numa mistura betuminosa produzida a quente (MBQ) é importante para se obter um bom desempenho desta. Num trabalho realizado por Yu et al (2017) foram estudadas diferentes taxas de incorporação de MBR misturadas com agregados novos e com temperaturas de aquecimentos diferentes. Os autores criaram uma equação linear para obterem o valor final pretendido para a MBQ, considerando como variáveis explicativas a temperatura da MBR e dos agregados, e a percentagem de betume existente na MBR (equação 1):

$$MBQ_{Temp} = 7,80 + 0,62 \times MBR_{Temp} + 0,43 \times Ag_{Temp} - 0,47 \times Perct_{MBR} \quad (1)$$

Onde

MBR_{Temp} é a temperatura da MBR (°C);

Ag_{Temp} é a temperatura dos agregados (°C);

$Perct_{MBR}$ é a percentagem de betume na MBR.

No quadro 2 estão representados os valores das temperaturas dos materiais e a taxa de incorporação de MBR que Yu et al (2017) obtiveram como aconselhável para as misturas. Segundo aqueles autores, as misturas com a incorporação de mais de 50% de MBR tiveram resultados satisfatórios no estudo da sensibilidade à água e na resistência à fadiga, mas o seu desempenho a nível da fratura térmica foi fraco.

Quadro 2: Taxa de incorporação de MBR em função das temperaturas dos materiais (adaptado: Yu et al, 2017)

Taxa de incorporação de MBR (%)	Temperatura da MBR (°C)	Temperatura dos agregados (°C)
30	100	190
40	100	205
50	100	215

Nota: com incorporação na mistura de dois aditivos, rejuvenescedor e SBR látex.

Uma possibilidade para aumentar a utilização de fresado numa central descontínua consiste na aplicação de um tambor secador separado, destinado a aquecer a MBR, conseguindo-se utilizar valores na ordem dos 70% (Neves et al, 2017). Contudo, Zhang et al (2019) referem que o uso de dois tambores secadores permite produzir misturas com mais de 80% de MBR, sendo a MBR aquecida entre 110 e 160°C, e o agregado novo aquecido entre 190 e 250°C.

Quando se utiliza mais de 30% de MBR na produção de uma MBQ é importante adicionar aditivos para melhorar a trabalhabilidade e o desempenho da mistura, como por exemplo agentes amolecedores e rejuvenescedores (Asli et al, 2012), referidos mais adiante neste trabalho.

A evolução tecnológica verificada nos últimos anos permitiu que as centrais conseguissem operar com maiores taxas de utilização de MBR. Zaumanis et al (2016), referem várias adaptações tecnológicas que têm sido realizadas, como por exemplo, a utilização de sistemas de filtração dos gases, nomeadamente do fumo azul que se forma devido à queima de componentes do ligante existente na MBR, o uso de tambores nos quais a MBR é aquecida de modo a evitar o contacto direto com as chamas, através da circulação do ar quente em contrafluxo ou conduzido por tubagens inseridas no tambor.

Zaumanis et al (2016), apresentam também um exemplo de uma central situada em Nova Iorque (figura 6) que utiliza um tambor convencional adaptado para trabalhar com 100% de MBR, possuindo um sistema de filtragens de fumo azul, para evitar o risco de combustão da MBR quando esta é aquecida diretamente. A MBR é separada em duas frações, uma grossa e outra fina, as quais necessitam de diferentes tempos de aquecimento. A fração grosseira entra no início do processo e a fração mais fina entra a meio do processo. O agente rejuvenescedor é pulverizado exteriormente sobre a MBR aquecido aproximadamente a 145°C.



Figura 6-Central convencional adaptada (adaptado Zaumanis et al,2014)

2.2.2 Problemas na utilização de MBR

Para assegurar o processo de fabricação com MBR é importante proteger o material da ação direta dos agentes climáticos e de fontes de contaminação.

O local de armazenamento deve ser arejado e coberto, as pilhas do material não devem exceder os 3 metros para evitar a segregação do material. As MBR devem ser armazenadas separadamente consoante a sua origem e devem ser caracterizadas no que se refere à análise granulométrica dos agregados e à percentagem de betume que possuem. Podemos ainda separar a MBR consoante a sua granulometria, tendo em atenção que as frações mais finas contêm maiores percentagens de betume.

A introdução de altas percentagens de MBR nas misturas altera as suas propriedades e, com isso, o seu desempenho. Zaumanis e Mallick (2015), referem três principais limitações da utilização de MBR: as propriedades do betume envelhecido existente na MBR, o grau de ligação e difusão que ocorre entre o betume envelhecido e o novo betume, e as propriedades dos agregados que compõem a MBR. Durante o processo de fresagem os agregados originais são quebrados, originando partículas de menores dimensões, o que implica um aumento de partículas mais finas na MBR, alterando a relação pó/betume e, com isso, o VMA. A variação do VMA (vazios da mistura de agregados) encontra-se relacionado com a maior ou menor capacidade de ligação do betume envelhecido, pois o VMA representa o volume de ar existente na mistura e o volume de ligante existente. Se uma determinada porção do betume da MBR não se ligar aos restantes constituintes, essa quantidade não conta como volume de ligante, mas sim como agregado da mistura. Na figura 7 estão representadas as relações volumétricas consoante a maior ou menor capacidade de ligação do betume envelhecido.

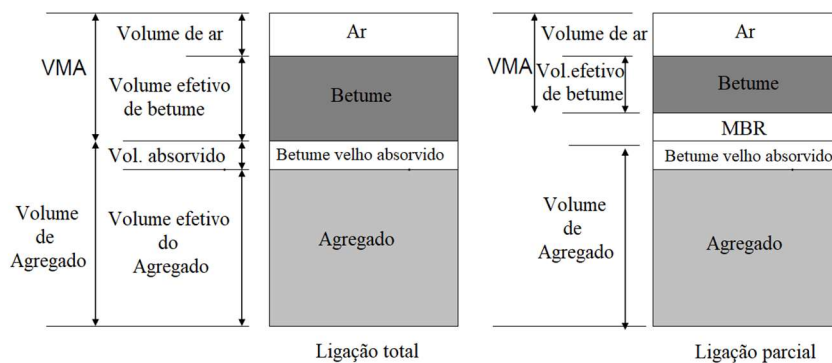


Figura 7– Relações volumétricas para diferentes cenários de ligação (adaptado Illinois Center for Transportation, 2009)

Os mesmos autores referem alguns dilemas na utilização de altas percentagens de MBR (Zaumanis et al 2016). Por um lado, o uso de altos valores de MBR na mistura acarretam problemas com a rigidez, ou seja, originam menos elasticidade do ligante existente na MBR, tornando a mistura mais rígida e menos flexível e, com isto, problemas de resistência à fadiga e, quando sujeita a temperaturas baixas, problemas inerentes à fratura térmica. Por outro lado, o uso de altas taxas de incorporação de MBR levam a uma maior resistência à deformação permanente, ou seja, maior capacidade para resistirem à formação de rodeiras no pavimento.

A capacidade de ligação entre o betume novo e o envelhecido existente na MBR é fundamental para o desempenho final da mistura. Estudos realizados por Yan et al (2014) consideram que existem três possibilidades da ligação do betume velho existente na MBR com o novo: (1) total ligação, ou seja, 100% do betume velho existente na MBR contribui de forma homogênea para a ligação dos constituintes da nova mistura; (2) ligação parcial, quando uma parcela do betume existente (“black rock”) não tem capacidade para ser ativado como ligante, de modo a contribuir para aglutinar os agregados da MBR e os agregados novos; (3) não há ligação entre os agregados da MBR, os quais se comportam como uma rocha negra revestida por um filme de betume envelhecido que não contribui para a ligação da nova mistura. Na figura 8 estão representadas essas três hipóteses. Segundo Zaumanis et al (2014), durante a fase de compactação a MBR devido ao efeito “black rock” exige maior energia de compactação.

Existem vários parâmetros que podem influenciar a ligação do filme de betume que se forma entre o betume novo e a MBR, designadamente a temperatura de mistura, as características geométricas dos agregados e a sua textura superficial (Cavalli et al, 2017).

Stimilli et al (2015) consideram importante conhecer a capacidade de ativação do betume envelhecido. Ao assumirmos uma escolha errada para essa capacidade de ativação, podemos introduzir um valor incorreto de betume novo na mistura e isso acarreta consequências para o desempenho final da mistura betuminosa.

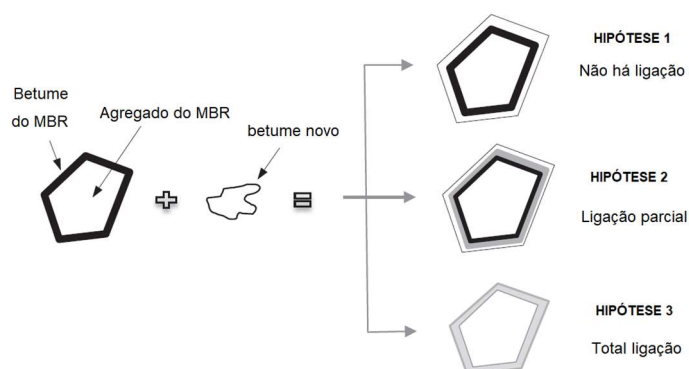


Figura 8– Hipóteses possíveis para a capacidade de ativação do betume existente no MBR (adaptado Moghaddam et al, 2016)

Segundo Lo Presti et al. (2016) a *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) refere que quando se utiliza mais de 55% de MBR numa mistura se verifica um acréscimo de 25% a 60% na sua rigidez em comparação com uma mistura nova. Apesar do problema que representa o aumento da rigidez, a mistura com MBR apresenta bons desempenhos na resistência à deformação permanente e na resistência à fadiga.

Com o objetivo de restabelecer as propriedades do betume envelhecido, utilizam-se aditivos. Estes produtos químicos são classificados em dois tipos: agentes amolecedores e rejuvenescedores. Os agentes amolecedores visam reduzir a viscosidade do betume envelhecido, enquanto que os rejuvenescedores restauram as propriedades químicas e reológicas do betume envelhecido. O efeito destes produtos em misturas betuminosas, têm sido estudados por vários investigadores e comprovaram que o seu uso melhora as características reológicas do betume envelhecido (Zaumanis et al, 2013, Mazzoni et al, 2018).

Um estudo realizado por Nam Tran et al (2016), estudaram três tipos de misturas, uma nova, e duas com 50% de MBR. Numa destas últimas foi adicionado um rejuvenescedor e na outra não. A mistura com rejuvenescedor resistiu aproximadamente 3,5 vezes mais do que a mistura sem rejuvenescedor no ensaio de avaliação da resistência ao fendilhamento, no overlay tester americano.

Os benefícios na utilização da MBR têm uma componente económica e outra ambiental. Do ponto de vista económico, os benefícios decorrem do facto de se utilizarem os agregados e o betume existentes na MBR. O uso de 20% a 50% de MBR diminui o custo de produção em 14% a 34 %, como vem referenciado na figura 9. Do ponto de vista ambiental, as vantagens centram-se no aproveitamento dos agregados e do betume existentes na MBR, evitando o uso de novos materiais, reduzindo o consumo de energia e as emissões de gases com efeito de estufa e, por último, diminuindo o volume de material enviado para aterro.

O desempenho final da mistura com altas taxas de incorporação de MBR, tal como com qualquer outra mistura betuminosa, passa pela qualidade do material que a compõe, o zelo utilizado na sua produção e na sua aplicação em obra.

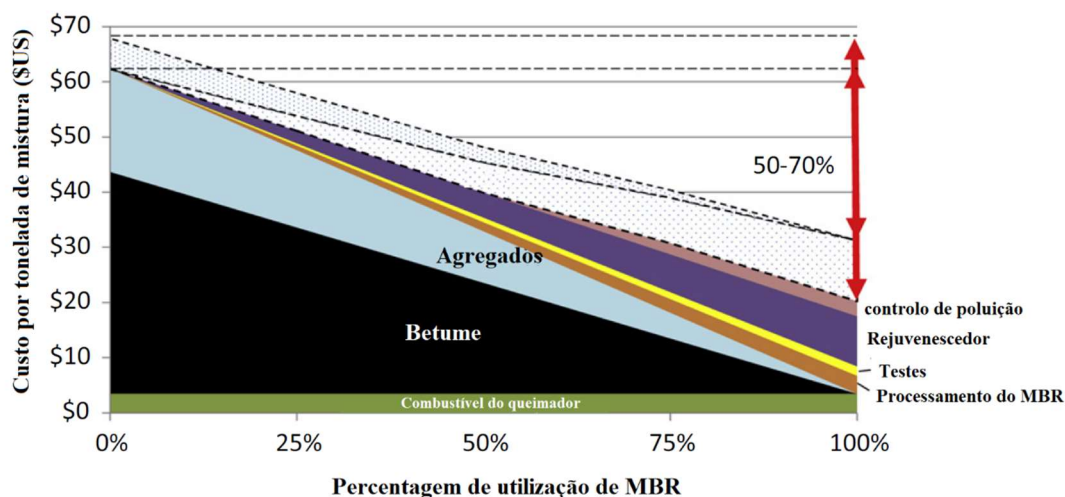


Figura 9– Custos dos materiais em misturas betuminosas (adaptado Zaumanis et al, 2014)

A escolha de parâmetros adequados de temperatura de fabrico, dosagens e tempo de mistura são essenciais para a qualidade de produção. Estes parâmetros influenciam a dispersão dos aditivos na mistura, o tempo e a temperatura de compactação e, por isso, são fatores importantes que não devem ser negligenciados.

2.2.3 Betume

O betume asfáltico é um hidrocarboneto obtido através do processo de destilação do crude, é um material semissólido quando submetido a temperaturas baixas, mas altera o seu comportamento quando submetido a um aumento da temperatura, tornando-se fluído quando aquecido a temperaturas superiores aos 140°C-150°C. A temperatura é um parâmetro importante, que influencia a viscosidade e a trabalhabilidade do betume, fatores importantes na fase de produção de uma mistura betuminosa e sua aplicação final. A sua composição química é complexa, sendo a análise completa dos seus componentes um processo trabalhoso, que produziria tanta informação que o relacionamento com as propriedades reológicas seria impossível (Picado et al, 2002).

A reologia é o ramo da física que estuda a deformação e a fluência dos materiais, de um modo geral explica o comportamento de um corpo quando sujeito a uma tensão. Este comportamento encontra-se representado em dois extremos: o elástico e o viscoso (Picado et al, 2002). Devido às suas características viscoelástica, o betume apresenta variações no seu comportamento mecânico, relacionado com a temperatura a que se encontra, com a intensidade do carregamento e o tempo de carregamento a que está submetido. Na figura 10 está representado o comportamento viscoelástico do betume.

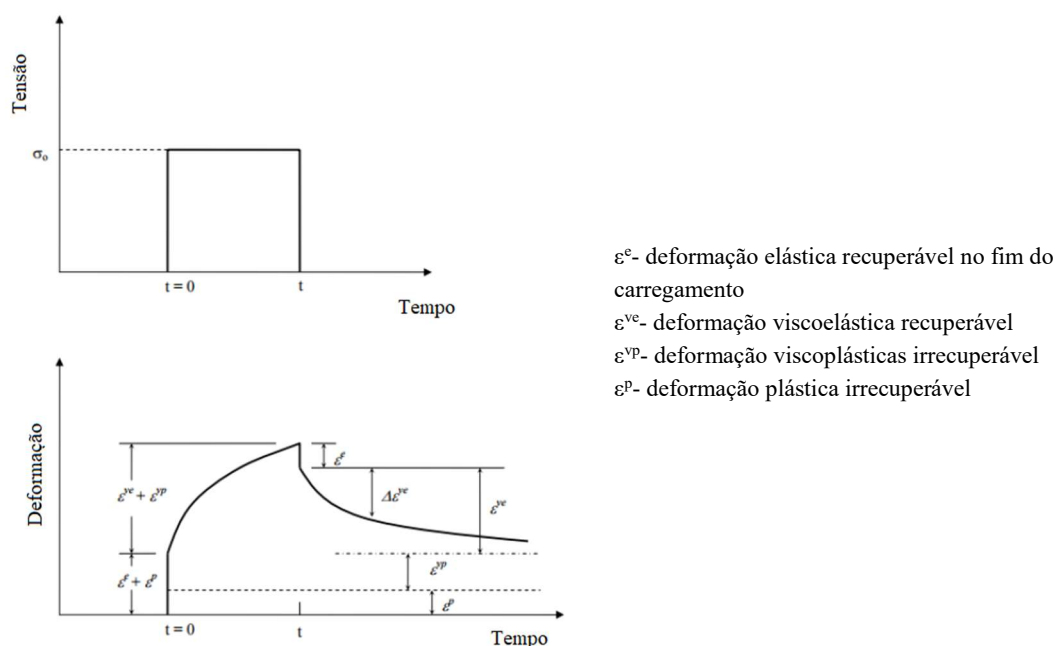


Figura 10 – Comportamento viscoelástico do betume (adaptado de Carvalho, 2018)

A viscosidade mede a resistência que um material apresenta ao escoamento. Um material com alta viscosidade tem maior dificuldade em escoar que um material com baixa viscosidade.

A composição química do betume varia consoante os seus constituintes. O método SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos) é o processo mais usual para avaliar a composição do betume, através da medição dos componentes saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos que compõem o ligante. O betume é, aproximadamente, constituído por 5 a 20 % de compostos saturados, formando cadeias lineares ou ramificadas, o que o torna num óleo viscoso não polar. Os aromáticos são líquidos viscosos polares que representam 40 a 60% do volume e possuem baixa massa molecular. As resinas são compostos polares, apresentando-se num estado sólido ou semissólido. Por fim, os asfaltenos são compostos sólidos de hidrocarbonetos saturados. (Carvalho, 2018). Na figura 11 mostra-se uma representação esquemática da solução coloidal do betume e dos seus constituintes.

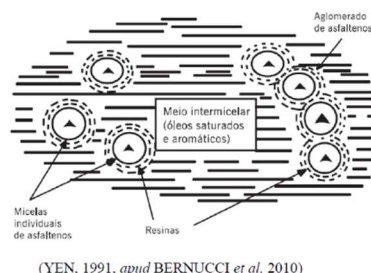


Figura 11 – Representação esquemática da dispersão coloidal do betume (Carvalho, 2018)

De um modo geral, pode dizer-se que os betumes são constituídos por duas subdivisões, os asfaltenos e os maltenos. Os asfaltenos com alto peso molecular é a fração responsável pela coloração preta que dá a cor característica ao betume e representa a fração insolúvel do betume, influenciando a rigidez e a viscosidade do betume. Quanto mais asfaltenos existirem no betume mais viscoso é este material. Os maltenos são voláteis constituídos por compostos saturados,

aromáticos e resinosos do betume. No quadro 3 resumem-se as características e funções típicas das frações dos maltenos e dos asfaltenos (Moghaddam et al, 2016).

Quadro 3: Asfaltenos e frações constituintes dos maltenos (adaptado de Moghaddam et al, 2016)

Componente fracionário	Descrição geral	Reatividade química	Função
Asfaltenos	Alto peso molecular	Muito baixa	Agente da estrutura
Compostos polares	Compostos polares	Alta	Peptizador para asfaltenos
Primeiros acidafinas	Hidrocarbonetos insaturados resinosos	Alta	Solvente para os peptizadores de asfaltenos
Segundos acidafinas	Hidrocarbonetos levemente insaturados	Baixa	Solvente para os peptizadores de asfaltenos
Hidrocarbonetos saturados	Ceras e Hidrocarbonetos saturados	Baixa	Gelificante

O betume sofre envelhecimento no seu processo de fabrico na refinaria, durante o armazenamento e durante o processo de produção da mistura betuminosa. As temperaturas elevadas na fase de produção da mistura e os raios ultravioletas levam à oxidação do betume. Estas alterações físicas e químicas que afetam o seu desempenho mecânico.

O envelhecimento do betume pode ser quantificado pelo Índice de Envelhecimento que é obtido pelo rácio da viscosidade do betume envelhecido e a viscosidade do betume original (Figura 12).

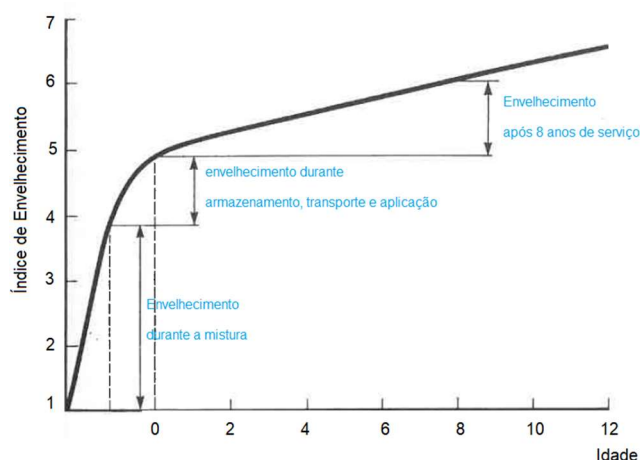


Figura 12– Índice de envelhecimento (adaptado: Hunter, Robert (2003). *Asphalts in road construction*. London, Thomas Telford Publishing)

2.2.4 Rejuvenescedores

O processo de envelhecimento do betume, como consequência da oxidação e da ação dos raios ultravioleta, origina uma alteração do rácio maltenos/asfaltenos. Esta alteração conduz a um aumento relativo dos asfaltenos e dos polares aromáticos em relação aos maltenos. Devido a este efeito o betume perde adesividade e fica mais viscoso, tornando a mistura betuminosa mais rígida e frágil. O processo de envelhecimento ocorre em duas fases. A primeira dá-se durante o fabrico da mistura betuminosa na central, o seu transporte e a sua aplicação em obra, ocorrendo a oxidação e perda dos componentes voláteis. A segunda fase do processo de

envelhecimento ocorre durante o período de serviço do pavimento, no qual este estará sujeito à ação do clima, dos raios ultravioletas e do tráfego.

Segundo Asli et al (2012), os rejuvenescedores têm um papel fundamental para a aplicação de misturas betuminosas fabricadas a quente com altas percentagens de MBR. A aplicação dos rejuvenescedores pode realizar-se pelos seguintes métodos (Moghaddam et al, 2016): adição ao processo de mistura a quente, pulverização sobre a superfície do pavimento e adição na forma de microcápsulas adicionadas na mistura. O mais utilizado é o primeiro método. No processo de pulverização o rejuvenescedor é aplicado 3 a 4 horas antes da construção, sendo crucial a monitorização da capacidade de penetração do rejuvenescedor e a difusão deste no betume. Nas microcápsulas o rejuvenescedor atua quando as membranas das cápsulas se romperem por ação do efeito do tráfego.

Zaumanis et al (2018) mencionam a adição de rejuvenescedor na central de produção de mistura betuminosa pode ocorrer de três formas: a montante do tambor secador da MBR, a jusante do tambor secador da MBR e adicionado ao betume novo. O processo mais usual é a adição a jusante do tambor secador, pois as centrais já possuem o sistema de dosagem instalado nestas condições. Segundo aqueles autores, o melhor processo é aquele em que o rejuvenescedor se encontra em contacto direto com a MBR a temperaturas elevadas, uma vez que isso promove melhor a difusão do rejuvenescedor, ativando o betume envelhecido. No quadro 4 resumem-se as vantagens e as desvantagens de cada uma destas soluções.

Quadro 4: Local da aplicação do rejuvenescedor em Central (adaptado de Zaumanis et al ,2018)

Adição do rejuvenescedor	Vantagens	Desvantagens
A montante do tambor secador de MBR	<ul style="list-style-type: none"> • Mais tempo em contacto com a MBR permitindo melhor difusão e ligação com os materiais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor precisão no doseamento. • Risco de evaporação durante o aquecimento.
A jusante do tambor secador de MBR	<ul style="list-style-type: none"> • Maior precisão na dosagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tempo de difusão do rejuvenescedor com a MBR e menor temperatura para promover as reações.
No betume novo	<ul style="list-style-type: none"> • Não necessita de nenhum dispositivo extra. • Precisão na dosagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • O rejuvenescedor não está em contacto direto com a MBR; • Menor tempo de difusão.

É necessário ter em consideração o tempo em que o rejuvenescedor fica submetido a altas temperaturas durante a mistura, pois tal pode conduzir à degradação térmica deste e à consequente perda das suas propriedades.

A atuação do rejuvenescedor consiste em ativar o betume envelhecido, de modo a que este consiga aglutinar os materiais e aumentar, assim, o desempenho da mistura betuminosa. Segundo Ping-Sien Lin et al (2011), devemos ter em atenção que o excesso de rejuvenescedor pode levar a problemas de adesividade e à desagregação do material.

Zaumanis et al (2014) indicam a ação que os rejuvenescedores devem garantir a curto e a longo prazo. A curto prazo, o rejuvenescedor deve difundir-se rapidamente na mistura de forma uniforme e ativar o betume envelhecido, de modo a torná-la mais trabalhável quando aplicada em obra. Na figura 13 estão representadas as etapas de difusão do rejuvenescedor. A maior parte da difusão deverá ocorrer antes da abertura da estrada ao tráfego para evitar a redução do atrito entre as partículas e com isso o aparecimento de rodeiras. A longo prazo, o rejuvenescedor deve garantir a reconstituição química e as propriedades físicas do betume envelhecido de forma a garantir a estabilidade da mistura durante o seu tempo de serviço, resistindo ao fendilhamento por fadiga e de origem térmica.

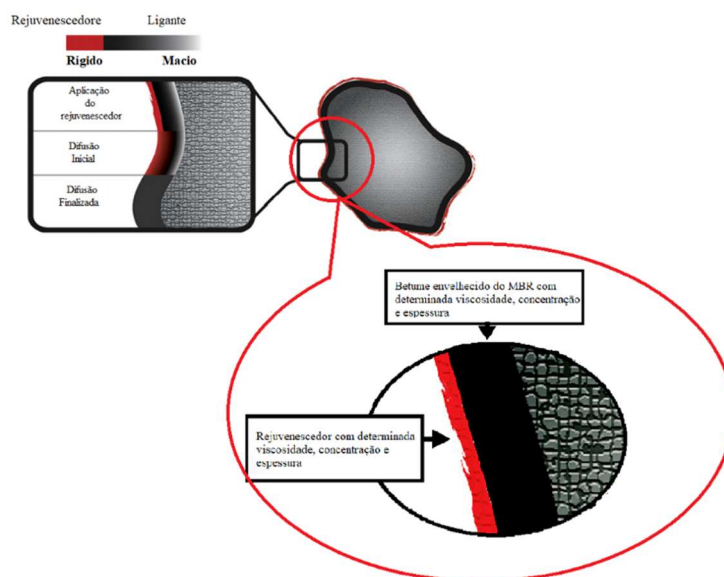


Figura 13– Difusão do rejuvenescedor (adaptado de Zaumanis et al, 2018)

O rejuvenescedor deve garantir também a coesão e a adesão entre o ligante e o agregado, de maneira a resistir aos danos causados pela água.

Segundo vários autores (Bonaquist, 2012, West L et al, 2013, Zaumanis e Mallick, 2013, Cavalli et al, 2018), existem cinco fatores para utilizar rejuvenescedores com êxito:

- 1) A dosagem ótima do rejuvenescedor deve ser determinada previamente em laboratório, sendo depois confirmada após produção em central;
- 2) Deve ter-se uma boa homogeneidade na MBR, principalmente na quantidade de betume que existe neste material, pois é sobre ele que o rejuvenescedor irá atuar;
- 3) Deve garantir-se uma distribuição homogênea do rejuvenescedor, de modo a evitar zonas mais flexíveis (onde atuou o rejuvenescedor) e outras nas rígidas na mistura final;

- 4) Deve garantir-se uma difusão homogênea do rejuvenescedor sobre o filme do ligante da MBR;
- 5) Deve garantir-se que o ligante da MBR se encontra ativado homogeneamente por ação do rejuvenescedor.

Os rejuvenescedores podem ter origem no petróleo ou ter origem orgânica (Zaumanis et al 2014). Os rejuvenescedores de origem petrolífera são os mais utilizados e o seu uso tem demonstrado bons resultados.

Com o objetivo de substituir os típicos rejuvenescedores de origem petrolífera, tem se apostado na utilização como rejuvenescedores de alguns subprodutos das atividades humanas. Como por exemplo os óleos usados, tanto em atividades industriais mecânicas na lubrificação de componentes mecânicos, como óleos alimentares usados nos setores da alimentação, quer doméstica quer industrial. No quadro 5 resume-se o uso de diversos rejuvenescedores estudados por Moghaddam et al (2016).

Quadro 5: Efeito de diferentes tipos de rejuvenescedores (adaptado de Moghaddam et al 2016)

Tipo de rejuvenescedor	(%) de rejuvenescedor	(%) de MBR	Propriedades			
			F	DP	SA	FT
Óleo comercial	2-3 por massa de mistura	15-48	N/D	A	A	N/D
Óleo comercial	2-3 por massa de mistura	15-40	N/D	X	X	N/D
OAU	12 por massa de betume	100	A	A	N/D	A
Óleo orgânico	12 por massa de betume	100	A	A	N/D	A
Óleo motor usado	12 por massa de betume	100	A	A	N/D	A
OAU	12 por massa de betume	100	A	A	X	A
Mistura orgânica	12,2 por massa de betume	100	N/D	N/D	N/D	A

F- Fendilhamento; DP- Deformação permanente; SA- Sensibilidade à água; FT- Fratura térmica

A- Aprovado X- Falhou N/D- Não disponível

Zaumanis et al (2014) realizaram um estudo com seis tipos diferentes de rejuvenescedores aplicados em misturas com 100% MBR, sendo um dos rejuvenescedores OAU aplicado numa dosagem de 12% da massa de betume, tendo obtido uma redução no valor do fator de resistência ao fendilhamento ($\text{Exsen}\Phi$).

2.3 Óleo Alimentar Usado e Sua Utilização em Misturas Betuminosas

2.3.1 Óleo alimentar usado

O óleo alimentar usado (OAU) provém dos resíduos das atividades domésticas e da indústria de restauração e alimentar, resultando principalmente dos processos de frituras de alimentos. Este resíduo constitui um sério problema ambiental quando lançado no meio ambiente.

A produção mundial de OAU é de aproximadamente 10 milhões de toneladas por ano (Azahar et al, 2015). Na figura 14 representa-se a sua distribuição pelos principais países produtores. Em Portugal a produção de OAU em 2015 foi de 22781 toneladas e continua em contínuo crescimento.

Sendo um produto orgânico e de origem vegetal, produzido através do uso de diversas sementes, como por exemplo a soja e o girassol, os consumidores julgam-no um produto biodegradável, lançando na rede de esgotos cerca de 60% do OAU tem este destino. (Fonte:

ZERO - Associação Sistema Terrestre Sustentável, <https://zero.org/portugal-fabrica-biodiesel-com-10-vezes-mais-oleos-alimentares-usados-importados-que-nacionais/>) Esta situação causa o entupimento dos sistemas de coletores e traduz-se numa diminuição na eficiência do tratamento das águas residuais. Além disso, transforma o OAU num dos maiores poluentes dos cursos de água e também um problema para os solos.

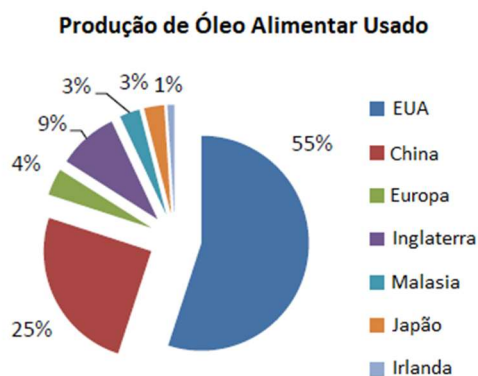


Figura 14– Produção Mundial por ano de Óleo Alimentar Usado (adaptado de Azahar et al, 2015)

Em Portugal o Decreto-lei nº 267/2009 (29 de setembro), estabeleceu um regime jurídico na gestão dos óleos alimentares usados produzidos pelos setores ligados à indústria de restauração, hotelaria (HORECA) e domésticos. No nosso país 70% dos OAU provêm da restauração e cerca de 25% do uso doméstico. Com o objetivo da recolha dos OAU, foram colocados em Portugal aproximadamente 5000 pontos de recolha, representados na figura 15.

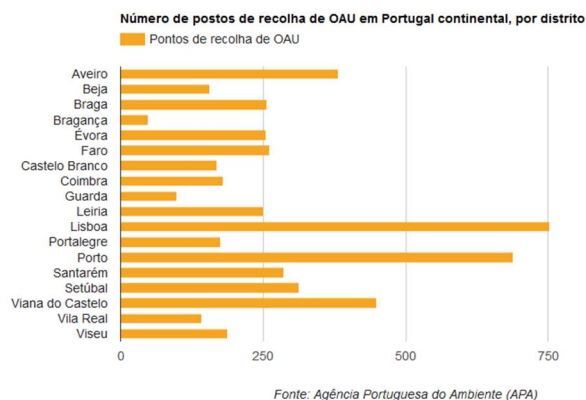


Figura 15– Número de postos de recolha de OAU (adaptado de APA)

Por cada tonelada de OAU que não vai para o aterro sanitário evita-se a emissão de aproximadamente 14 toneladas de gases com efeitos de estufa, associadas à biodegradação deste produto na ausência do oxigénio (fonte: Quercus, <https://www.quercus.pt/fileiras-residuos/3617-oleos-alimentares-usados/>).

2.3.2 Utilização de OAU em Misturas Betuminosas

Com a crescente utilização de MBR, a procura de rejuvenescedores tem vindo a crescer no mercado. Vários investigadores têm apostado na substituição dos rejuvenescedores mais comuns por subprodutos ou resíduos das atividades humanas, numa perspetiva económica e ecológica.

Em Espanha, Romera et al (2006), utilizaram óleo de motor usado como rejuvenescedor, obtendo bons resultados à deformação permanente e na redução das temperaturas necessárias para a mistura e compactação (Asli et al, 2012). Este sucesso levou a que outros investigadores apostassem na utilização do Óleo Alimentar Usado (OAU) como rejuvenescedor de MBR.

Os estudos realizados por vários autores comprovaram que o OAU tem um efeito rejuvenescedor do betume envelhecido (Asli et al, 2012, Zargar et al, 2012, Wen et al, 2013, Azahar et al, 2016).

Asli e Karim (2012) envelheceram três tipos de betumes (50/60, 40/50 e 30/40), tendo diluído no betume diferentes percentagens de OAU. Concluíram através de ensaios de penetração, de determinação da temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola e de medição da viscosidade que o OAU tem capacidades rejuvenescedoras. Também concluíram que o OAU teve a capacidade de alterar o rácio asfaltenos/maltenos, ou seja, consegue aproximar as propriedades reológicas do betume envelhecido às do betume novo.

Zargar et al (2012) realizaram estudos semelhantes, submetendo um betume 80/100 a um processo de envelhecimento até obterem propriedades próximas das de um betume do tipo 40/50. Depois adicionaram OAU para o rejuvenescimento do ligante com diferentes percentagens relativamente a massa de betume. Concluíram que uma percentagem de 3% a 4 % de OAU teve a capacidade de rejuvenescer o betume envelhecido, melhorando as suas capacidades reológicas e físicas para valores próximos dos de um betume 80/100.

No quadro 6 resume-se a alteração química sofrida pelo betume rejuvenescido com o OAU, sendo notória a redução do rácio asfaltenos/maltenos.

Quadro 6: Componentes químicos do betume virgem e do betume rejuvenescido com OAU (adaptado Zargar et al, 2012)

	Asfaltenos (% da massa)	Maltenos (% da massa)	Asfaltenos/Maltenos (% da massa)
Betume original	9,23	90,77	10,17
Betume envelhecido	10,98	89,02	12,34
Betume rejuvenescido com OAU	9,69	90,31	10,73

No estudo realizado por Azahar et al (2016), no qual foi adicionado OAU a um betume 60/70 envelhecido de duas formas distintas. Numa amostra o OAU que se adicionou ao betume não foi tratado. Na outra amostra o OAU sofreu um tratamento, através da transesterificação. Neste processo o OAU reage com o metanol (álcool) na presença de hidróxido de sódio (NaOH) resultando na separação do OAU tratado (éster) e glicerol, levando a uma diminuição da acidez. Ambas as amostras obtiveram maiores valores de penetração e pontos de amolecimento mais baixos que o betume simples, sem tratamento. A nível do fator de resistência à deformação ($E^*/\sin\Phi$), observou-se que a utilização de OAU aumentou os valores daquele parâmetro em

comparação com os valores do betume simples, o que significa que se obteve melhores desempenhos à deformação permanente.

Azahar et al (2016) verificaram que existe uma diminuição da viscosidade do betume quando se utiliza OAU. Esta diminuição leva a uma melhor trabalhabilidade do material e a uma diminuição do consumo de energia, pois diminui o tempo e a temperatura de mistura, e o tempo de compactação. Aqueles autores concluíram que a acidez do OAU influencia a reologia e com isso o desempenho da mistura. Valores mais baixo da acidez garantem melhores desempenhos, existindo uma melhor ligação entre o OAU e o betume. O OAU tem um efeito antioxidante na mistura, quanto menos ácido for o OAU melhor será o efeito antioxidante.

Fernandes (2018) realizou uma mistura com 100% de MBR, utilizando material proveniente de um AC 14 da autoestrada A23, ao qual adicionou 1% de betume novo e 18% de OAU sem tratamento com o objetivo de rejuvenescer o betume envelhecido. Aquele autor comparou os resultados que obteve com outros dois AC14 convencionais estudados noutros trabalhos. A mistura rejuvenescida apresentou um aumento de 14 a 24 % no módulo de rigidez e um decréscimo no ângulo de fase de 3 a 17 % em relação às misturas convencionais tomadas para comparação (figura 16).

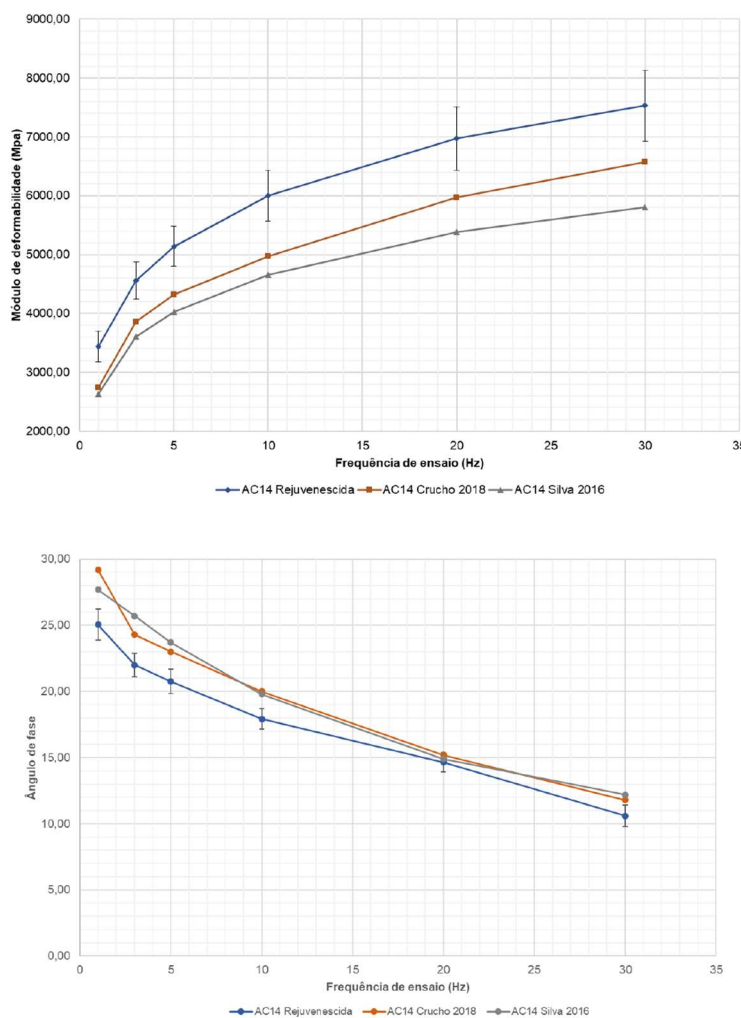


Figura 16-Representação do módulo de rigidez e do ângulo de fase (adaptado de Fernandes, 2018)

No que diz respeito à resistência à fadiga, a mistura rejuvenescida apresentou melhor comportamento que as misturas de referência consideradas para comparação (figura 17). Fernandes (2018) concluiu que as variações obtidas não são significativas tanto para o módulo de rigidez como para o ângulo de fase, demonstrando assim que a mistura rejuvenescida não apresentou um comportamento frágil. No ensaio de sensibilidade a água, a mistura rejuvenescida teve um desempenho superior as outras.

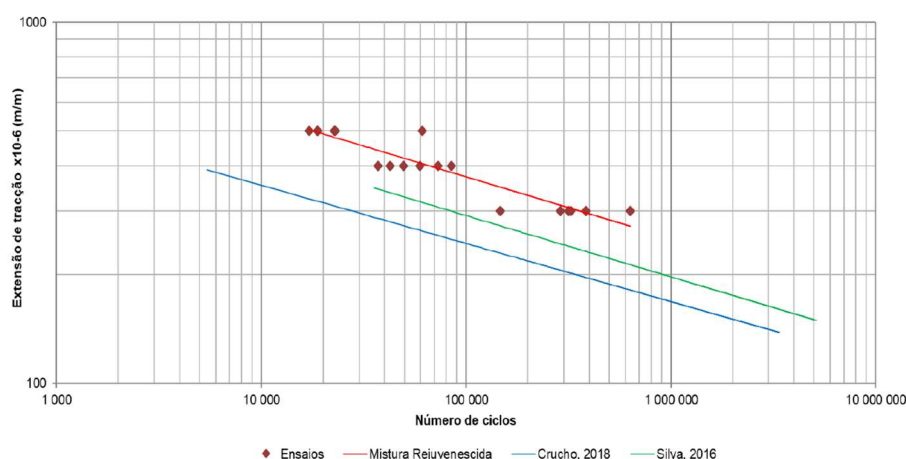


Figura 17– Representação das leis de fadiga das misturas (adaptado de Fernandes, 2018)

No estudo da resistência à deformação permanente pelo ensaio de wheel-tracking, a mistura rejuvenescida apresentou maiores deformações que os resultados obtidos para os outros dois AC14 convencionais. Aparentemente o comportamento observado ficou a dever-se ao efeito do amolecimento do betume rejuvenescido pelo OAU que aumentou a suscetibilidade da mistura betuminosa a temperaturas médias e altas. Também a quantidade de ligante total na mistura pode ter sido superior à considerada pelo facto de o valor de betume residual da MBR nas amostras ser superior ao medido inicialmente.

2.4 Resíduos de Plástico e Sua Utilização em Misturas Betuminosas

2.4.1 Resíduos de plástico

O plástico é um material constituído por polímeros orgânicos, por modificação química de substâncias naturais ou sintéticas. Os polímeros são moléculas longas, constituídas em torno de uma cadeia de átomos de carbono associados a átomos de hidrogénio, oxigénio, enxofre e nitrogénio, unidos por reações de polimerização formando uma macromolécula, e apresentando um comportamento viscoelástico. As técnicas de fabrico do plástico levaram a baixos custos de produção e tornaram este material, leve, fácil de moldar e resistente aos agentes atmosféricos, muito utilizado na atividade humana. (fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic#Structure>)

Existem três tipos de polímeros, os termoestáveis, os elastómeros e os termoplásticos. Os termoestáveis são rígidos e frágeis, sendo muito estáveis a variações de temperaturas. Uma vez produzidos não podem fundir-se novamente, o que torna a sua reciclagem impossível. Os elastómeros apresentam alta elasticidade e não são rígidos, mas a sua reciclagem é um processo complicado. Os termoplásticos fundem com o aumento da temperatura, o que facilita a sua

moldagem. Este material pode ser submetido várias vezes a aquecimento, apresentando assim uma vantagem para a sua reciclagem. Incluem-se neste grupo de plásticos o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), o Polietileno de Alta Densidade (PEAD), o Poliestireno (PS), o Polipropileno (PP), o Politereftalato de Etileno (PET) e o policloreto de vinilo (PVC).

O PEBD é um produto bastante competitivo com grande e variada utilização industrial, desde filmes (película aderente), sacos de plástico, estruturas para embalagens.

A reciclagem dos termoplásticos pode não ser economicamente viável, devido ao seu baixo preço e a sua baixa densidade. Somente os Polietileno e o PET apresentam potencial económico para serem reciclados. É de salientar que com o processo de reciclagem, os plásticos vão perdendo as suas qualidades e propriedades. (Explicatorium, consultado em abril 2019). Em consequência da procura de plásticos, a sua produção a nível mundial cresceu exponencialmente, como se ilustra na figura 18. Devido às suas características, os plásticos demoraram centenas de anos a degradarem-se em condições ambientais normais, permanecendo no meio ambiente como uma ameaça potencial. À escala global produzem-se cerca de 150 milhões de toneladas de resíduos de plástico por ano (Singh et al, 2017). A União Europeia (UE) é responsável pela produção de 58 milhões de toneladas de plástico por ano, destinando-se 40% a embalagens, 22,5% a bens de uso doméstico e de consumo, 20% a edifícios e construção, 9% a automóveis e camiões, 6% a equipamento elétrico e eletrónico e 3% à agricultura (fonte APA: <https://apambiente.pt/?ref=x254>).

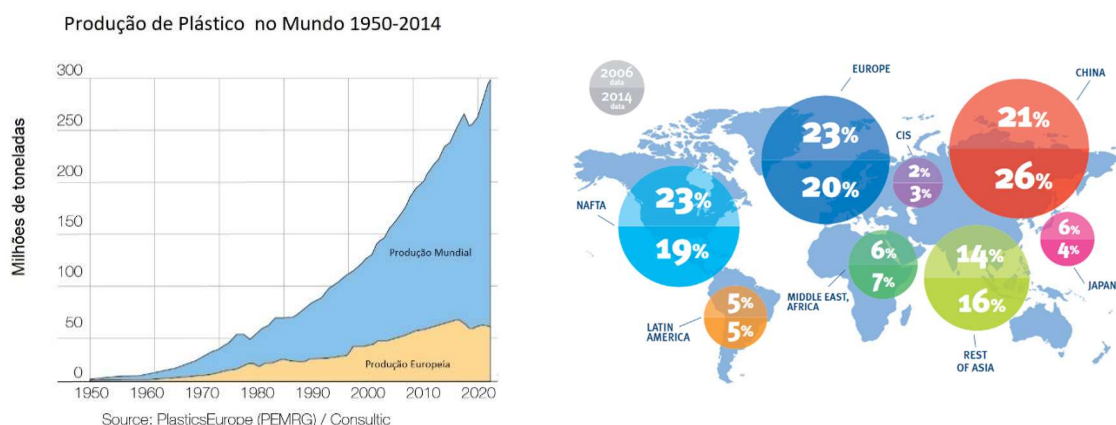


Figura 18-Produção de plásticos no mundo (Adaptado de Plastics Europe)

Quando a recolha e o tratamento dos resíduos não existem ou são deficientes, os plásticos acabam por atingir o meio natural. Os resíduos de plásticos gerados nos países membros da UE, aproximadamente 25,8 milhões de toneladas por ano, menos de 30% são recolhidos para serem reciclados, acabando em aterros (31%) e incinerados (39%). Considerando o não aproveitamento das embalagens de plásticos as perdas que isso representa para a UE cifram-se entre os 70 e os 105 mil milhões de euros por ano. Em dezembro de 2015, a União Europeia (UE) adotou um plano de ação sobre o problema constituído pelos resíduos de plástico, dentro do espaço europeu, intitulado “Uma Estratégia Europeia para os Plásticos na Economia Circular” (Fonte: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/pt/TXT/?uri=CELEX:52018DC0028>).

O objetivo desta estratégia consiste em reutilizar, reaproveitar e inovar os resíduos de plástico ao longo de toda a cadeia de valor do ciclo de vida do produto. Na figura 19 ilustra-se

a produção de resíduos de plástico na UE em 2015, sendo bem visível o impacto das embalagens no total de resíduos gerados.

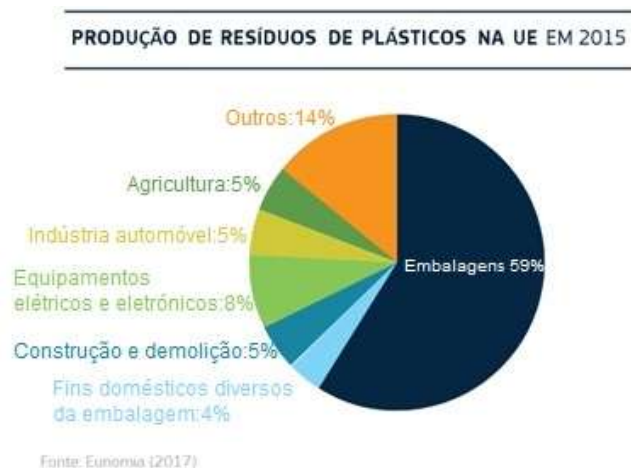


Figura 19- Produção de resíduos de plásticos na UE em 2015 (Adaptado de Plastics Europe)

2.4.2 Utilização de plásticos em misturas betuminosas

Os betumes tradicionais utilizados no fabrico de misturas betuminosas apresentam limitações quando sujeitos a sobrecargas e as ações dos elementos climáticos particularmente severos. Para altas velocidades e baixas temperaturas, o betume tem um comportamento elástico sólido, nestas condições a mais típica patologia que surge é o fendilhamento térmico devido às diferenças de temperatura. Quando submetido a baixas velocidades e altas temperaturas, o betume tem um comportamento mais viscoso, sendo a patologia mais comum as deformações permanentes.

Com o objetivo de colmatar as limitações do betume, tem-se produzido betumes modificados, com a introdução de polímeros. A utilização de uma grande variedade de polímeros mostra melhorias no desempenho das misturas a vários níveis.

Nos nossos dias tem-se apostado na substituição dos polímeros virgens por polímeros originários de resíduos de várias proveniências, tais como plásticos provenientes das atividades humanas.

O processo de incorporação dos polímeros na mistura pode realizar de duas maneiras distintas: a via húmida e a via seca. Na via húmida os polímeros são misturados no betume aquecido e por agitação até se obter uma mistura homogénea, sendo um processo demorado e com custos energéticos. Na via seca, os polímeros são adicionados diretamente durante a fase da produção da mistura, sendo o processo mais simples e económico.

Os resultados obtidos na utilização de polímeros reciclados, são praticamente semelhantes ao uso de polímeros virgens. Em 1986 Jew e Woodhans, referidos por Kumer et al (2009), confirmaram o uso de polietileno como um potencial modificador do betume, aumentando a resistência ao fendilhamento. Os estudos de Salab e Suparna em 2000, citados por Saroufim et al (2018), indicam bons resultados de resistência à fadiga de misturas betuminosas quando se adiciona polipropileno e polietileno de baixa densidade.

Num estudo realizado por Naskar et al (2010) os investigadores modificaram um betume 60/70, muito utilizado na Índia, mas com desempenhos pouco satisfatórios, através da adição

de percentagens até 7% de plástico (relativamente ao peso do betume) proveniente dos RSU. A adição do plástico alterou as características do comportamento do betume. O valor de 5% de resíduos de plástico adicionados foi o que apresentou melhores. Na figura 20 mostram-se alguns valores obtidos para as propriedades do betume.

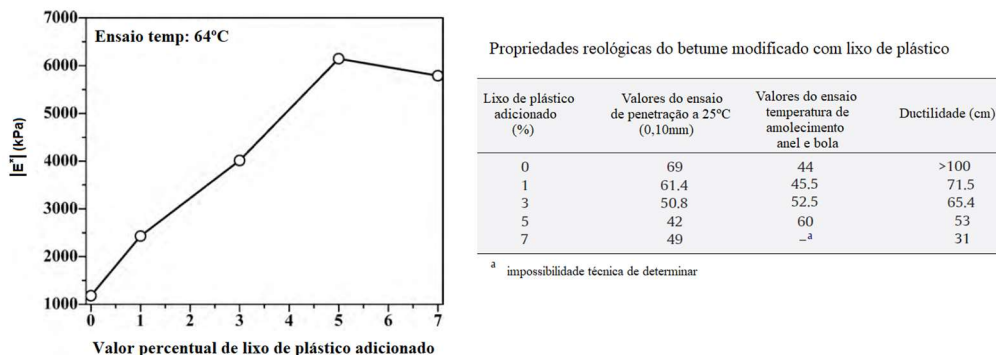


Figura 20— Variação da rigidez e das propriedades reológicas do betume (Adaptado de Naskar et al, 2010)

No seu trabalho de investigação, Abreu (2012) modificou um betume 50/70 com dois subprodutos: óleo de motor usado (OMU) e PEAD. Utilizando diferentes percentagens destes produtos no betume e, após obter os resultados mais satisfatórios, realizou misturas betuminosas com 50% de material fresado e com o betume modificado com OMU e com PEAD. Os resultados mostraram que o OMU reduziu a viscosidade do betume, enquanto que o PEAD aumentou a viscosidade do betume, o que permite a utilização em conjunto dos dois subprodutos.

Numa investigação realizada por Fonseca (2018), com o objetivo de substituir parcialmente a massa de betume novo por plástico reciclado, provenientes dos RSU, a autora realizou várias misturas do tipo AC14 surf 35/50 utilizando 4 tipos de plásticos: um ABS, dois tipos de PEAD (PEAD500 e PEAD_{verde}) e um PEBD, fazendo variar em cada grupo destes a percentagem de plástico (0% a mistura padrão, 2,4,6 e 8%). No estudo Marshall, na comparação das diferentes misturas, com a mistura padrão, a introdução dos diferentes tipos de plásticos, originou uma melhoria na estabilidade, mas levou a um aumento da deformação, quando a taxa de substituição do betume por plástico foi de 4 a 6%. As baridades, apresentadas pelas diferentes misturas não são significativas, andam próximas. Nas porosidades das misturas, a introdução do plástico levou a comportamentos distintos. Quando se introduz 6% dos diferentes tipos de plásticos, nas misturas, as misturas com PEBD, PEAD500 e PEAD_{verde} têm um aumento nos valores das suas porosidades, a mistura com ABS tem um comportamento oposto, a sua porosidade diminui.

No estudo à sensibilidade a água, as misturas apresentaram um ITRS próximos dos 90 e 80%, com exceção da mistura com 6% de PEAD500, cujo o ITRS foi de 70%.

Em outro estudo realizado por Fonseca et al. (2019), os autores compararam uma mistura convencional AC14 surf 35/50 com outra na qual utilizaram o mesmo betume e os mesmos agregados, mas introduziram 6% de PEBD, relativamente à massa do betume utilizado na mistura. Os resultados obtidos foram satisfatórios. A introdução do PEBD levou a um aumento nos valores da estabilidade Marshall e a menores deformações. A resistência à ação da água

apresentou valores de ITSR acima de 80%. No ensaio de pista (wheel-tracking) a mistura com PEBD apresentou maiores resistência à deformação permanente. A mistura com PEBD apresentou maior rigidez que a mistura de referência e na resistência à fadiga o desempenho foi ligeiramente inferior ao obtido pela mistura padrão. Na figura 21 está representada a lei da fadiga das misturas avaliadas naquele estudo.

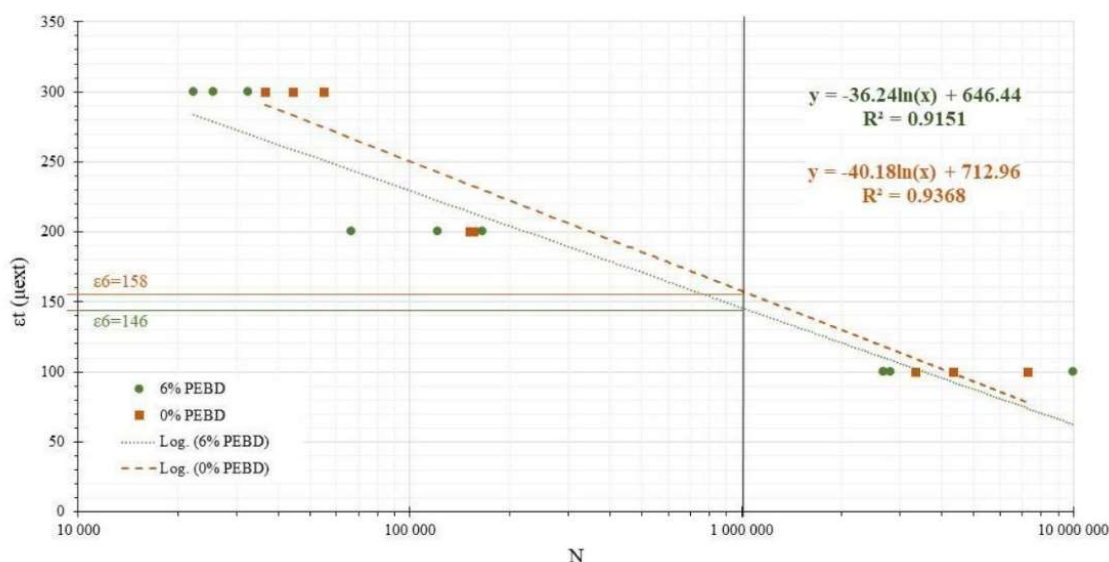


Figura 21– Representação gráfica da lei da fadiga (adaptado de Fonseca et al, 2019)

Outro grupo de investigadores, Almeida et al (2019), produziram misturas betuminosas, do tipo AC 14 surf contendo 5,0% de betume, nas quais foram adicionadas diferentes percentagens de PEBD, como substituto parcial do betume. A mistura de referência foi a de 0% de PEBD. A percentagem de plástico utilizada para a conclusão do estudo foi de 6% de PEBD. Os autores analisaram o efeito do plástico introduzido na mistura, em amostras correntes e em amostras submetidas a envelhecimento. O envelhecimento da mistura foi realizado submetendo as amostras na estufa durante 120 horas, a uma temperatura de 85°C.

Os resultados obtidos por Almeida et al (2019) permitiram salientar que a introdução do PEBD melhorou o desempenho mecânico da mistura, quando comparado com o da mistura padrão. No estudo da sensibilidade à água a mistura padrão obteve melhor desempenho em comparação com a mistura com plástico, mas o valor de ITSR obtido para esta última foi superior a 82%, o que é muito satisfatório. Obtiveram menores deformações no ensaio de wheel-tracking (RD_{air} da mistura de plástico foi de 3,5 mm e o RD_{air} padrão foi de 10,3 mm). Ao nível do estudo do módulo de rigidez, aqueles autores concluíram que a adição do plástico originou um aumento do módulo e uma diminuição do ângulo de fase. Na resistência à fadiga, para uma vida de 10^6 ciclos é necessário induzir 122 $\mu m/m$ de extensão em cada carregamento, sendo este valor de 131 $\mu m/m$ para a mistura sem PEBD. No processo de envelhecimento das duas misturas, a mistura com plástico obteve melhores desempenhos que a mistura padrão. Assim, os autores do estudo concluíram que a introdução do PEBD foi benéfica para melhorar o desempenho mecânico das misturas estudadas.

3 Estudo Laboratorial

3.1 Considerações iniciais

O objetivo do presente estudo consiste na caracterização de duas misturas betuminosas incorporando elevadas percentagens de MBR, utilizando o mesmo material fresado que foi usado por Fernandes (2018). A produziu-se com MBR proveniente da autoestrada A23 (Autoestrada da Beira Interior), fornecido pela empresa JJR Construções SA, e incorporou-se óleo alimentar usado (OAU) com a função de rejuvenescedor, tal como utilizado por Fernandes (2018). No estudo laboratorial que se apresenta avalia-se também o efeito da introdução de polietileno de baixa densidade (PEBD), proveniente de plástico recuperado dos resíduos sólidos urbanos, como substituto parcial da massa do betume novo adicionado. O PEBD tem a mesma origem que o utilizado por Fonseca (2018) num estudo em que utilizou diferentes tipos de subprodutos de plástico.

Uma das misturas incorpora 100% de MBR (designada por 100MBR), 18% de OAU relativamente à massa de ligante, 6% de PEBD em relação à massa de betume e 1% de betume 35/50 novo relativamente à massa de mistura. A outra mistura, designada por 85MBR, é composta por 85% de MBR, 15% de agregado 4/16 novo de origem granítica, 18% de OAU, 6% de PEBD e 1,5% de betume 35/50 novo.

Na mistura 85MBR a introdução do agregado novo visa melhorar o esqueleto da mistura, pois, no processo de fresagem do pavimento rodoviário, o agregado sofre esmagamento, tornando mais fina a sua granulometria. Esta adição de agregado mais grosseiro teve como principal objetivo a melhoria do desempenho da mistura em relação ao observado por Fernandes (2018).

O presente estudo foi realizado em duas fases distintas, representadas esquematicamente na figura 22. A primeira fase foi realizada no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC). Nesta primeira fase realizaram-se, para as duas misturas em análise, os seguintes estudos: Marshall, sensibilidade a água, resistência à tração indireta (ITS) e à compressão uniaxial com aplicação repetida de cargas.

A segunda fase do estudo foi realizada no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Instituto Superior Técnico (IST), em Lisboa, tendo-se produzido duas misturas para a fabricação de um conjunto de lajes para a avaliação da resistência à deformação permanente em ensaios de pista de laboratório (*wheel-tracking*), do módulo de rigidez e da resistência à fadiga em ensaios de flexão em quatro pontos (*four-point bending*).

Além de ter fornecido a MBR para este estudo, a JJR Construções SA forneceu também o relatório de produção e a caracterização da mistura original (AC14 surf), o agregado novo 4/16 de natureza granítica e determinou a percentagem de betume existente na MBR (anexo B).

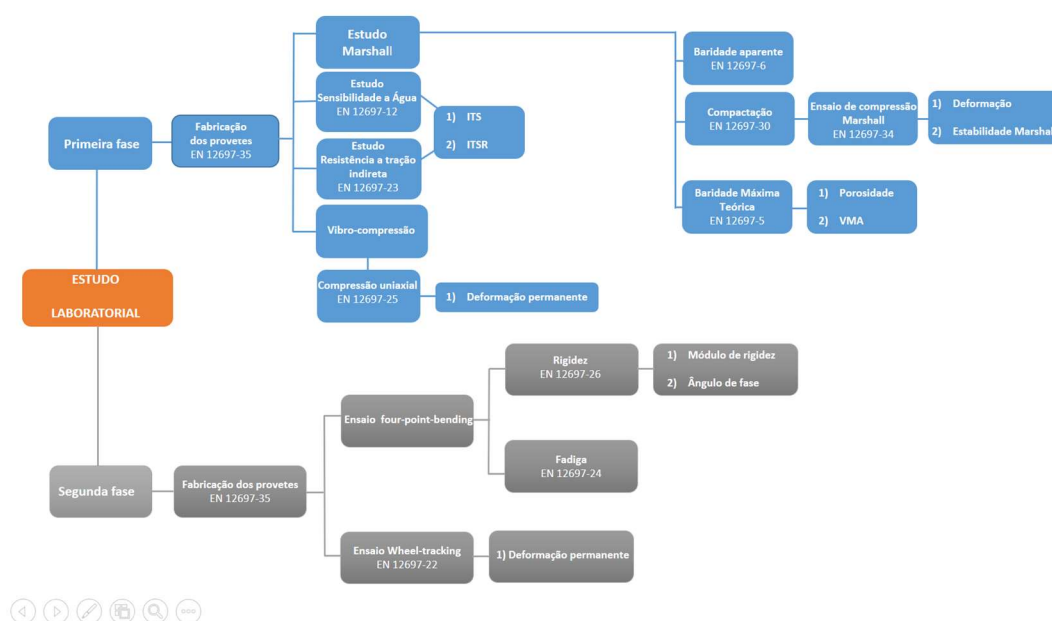


Figura 22– Esquema do estudo laboratorial

3.2 Caracterização do material utilizado no estudo

3.2.1 MBR

A MBR utilizada neste estudo é um AC 14 surf 35/50, utilizado como camada de desgaste na autoestrada A23. No quadro 7 apresenta-se a composição da mistura original, constituída por quatro frações de agregado, fíler comercial e betume. A baridade média da mistura que deu origem à MBR, de acordo com a informação prestada pelo construtor, era de 2382 kg/m³, a porosidade de 4,3 % e a resistência conservada em tração indireta (ITSR) de 90%. As granulometrias das misturas 100MBR e 85MBR estão representadas na figura 23.

Quadro 7: Composição da mistura AC 14 surf 35/50 da JJR Construções SA

Materiais	Percentagens
Pó calcário 0/4	15%
Quartzito 0/6,3	36%
Quartzito 4/10	24%
Quartzito 10/16	23%
Fíler	2%
Betume (35/50)	5,0%

A percentagem de betume existente na MBR determinada no ensaio de incineração foi de 4,5 %, após consideração da correção da perda de massa de agregado no processo de queima. Antes da sua utilização nos ensaios, a MBR foi espalhada no laboratório, ao ar, de modo a facilitar a sua secagem, como vem ilustrado na figura 24.

Após a secagem ao ar, o material foi sujeito a um processo de peneiração, utilizando o peneiro de malha 20 mm com o objetivo de remover as partículas de maiores dimensões, corpos estranhos à mistura e os aglomerados de partículas. As partículas de maiores dimensões e outros materiais estranhos à MBR foram excluídos. Quanto aos aglomerados de partículas, foram

colocados na estufa durante o tempo necessário para facilitar a sua desagregação manual. Após este tratamento, o material foi acondicionado e armazenado para posterior utilização.

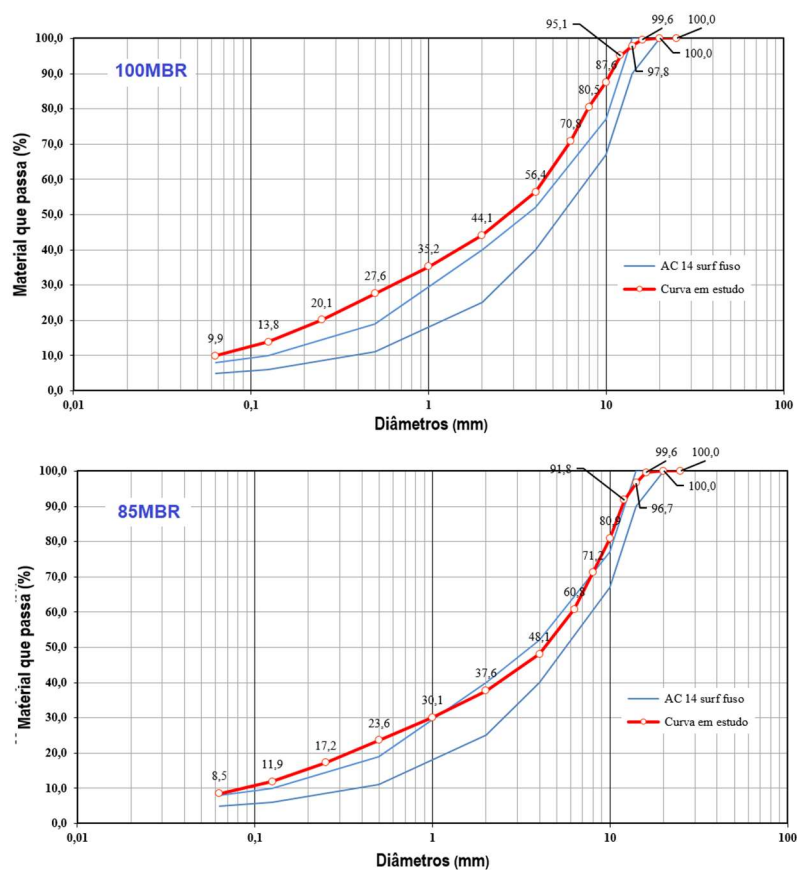


Figura 23- Curvas granulométricas das misturas 100MBR e 85 MBR em estudo



Figura 24- Material fresado utilizado no estudo

3.2.2 Óleo Alimentar Usado

O OAU utilizado neste estudo é óleo vegetal refinado de girassol, de origem doméstica, tendo sido recolhido pelo autor. Como seria de esperar de um óleo usado, existiam inúmeras partículas na solução, tendo sido necessária a sua remoção. O óleo não sofreu qualquer tratamento químico, tendo sido submetido apenas a um tratamento físico que consistiu num simples processo de decantação e filtragem como se representa na figura 25.

A filtragem ocorreu em duas fases. A primeira, usando um coador para remover as partículas mais grosseiras existentes na solução, provenientes do processo de fritura; na segunda, filtragem utilizou-se papel de filtro, obtendo-se, assim, um produto final sem partículas visíveis em suspensão.

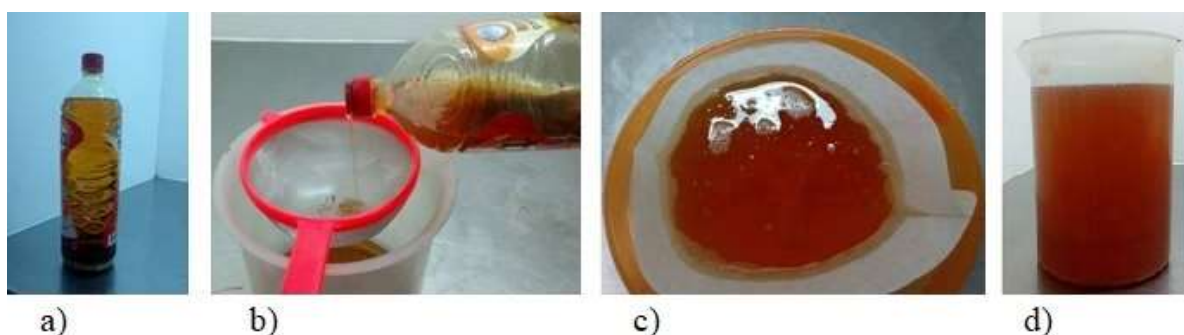


Figura 25– Processo de filtragem do OAU: a) OAU, b) filtragem com coador, c) filtragem com papel de filtro, d) produto final

3.2.3 Polietileno de Baixa Densidade

O PEBD utilizado no estudo foi cedido pela empresa Ambiente - Recuperação de Materiais Plásticos, SA. Na figura 26 ilustra-se parte do processo do tratamento do plástico, proveniente da recolha de resíduos sólidos urbanos, que se realiza nas instalações da empresa. Este material foi o mesmo que Fonseca (2018) utilizou no seu trabalho, o qual será considerado mais adiante para comparação de resultados.

O PEBD foi aplicado diretamente na fase de produção das misturas betuminosas, tendo sido introduzido por via seca na mistura, como substituto de 6% da massa do betume da mistura.



Figura 26– Triagem e trituração dos materiais plásticos de RSU na empresa Ambiente – Recuperação de Materiais Plásticos, SA

3.2.4 Betume asfáltico

O betume utilizado no estudo é um betume 35/50 produzido pela CEPISA. No quadro 8 apresentam-se as características do betume.

Quadro 8- Características do betume asfáltico 35/50⁽¹⁾

Requisito essencial	Norma de ensaio	Unidade	Valor
Penetração a 25°C	EN 1426	0,1 mm	35-50
Temperatura de amolecimento	EN 1427	°C	50-58
Resistência ao endurecimento a 163°C (EN 12607-1)			
Penetração retida	EN 1426	%	≥53
Aumento da temperatura de amolecimento-Severidade 2	EN 1427	°C	≤11
Variação em massa (valor absoluto)	EN 12607-1	%	≤0,5
Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥240
Solubilidade	EN 12592	%	≥99
Índice de penetração	EN 12591 anexo A	-	-1,5 a +0,7
Temperatura de fragilidade Fraass	EN 12593	°C	≤-5
Viscosidade cinemática a 135°C	EN 12595	mm ² /s	≥370

⁽¹⁾ Ficha de produto da Cepsa

3.3 Primeira fase do estudo laboratorial

Na primeira fase do estudo laboratorial, realizada no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do ISEC, foram produzidas duas misturas betuminosas, 100MBR e 85MBR, com percentagens elevadas de MBR, OAU e PEBD. Na figura 27 mostram-se imagens dos constituintes das misturas, representados nas proporções das dosagens na mistura 85MBR.



Figura 27– Constituintes da mistura 85MBR: a) betume novo, b) OAU, c) MBR, d) PEBD, e) agregado novo 4/16

Para as misturas em estudo, foi considerada uma percentagem total de betume na ordem de 5,5%, de modo a obter uma composição próxima da mistura original, fresada para a obtenção da MBR. Uma vez que a percentagem de betume determinada na MBR foi de 4,5%, foi necessário adicionar betume novo às misturas para, por um lado, perfazer o valor-alvo pretendido e, por outro lado, para repor uma parcela de ligante envelhecido existente na MBR

considerado não ativo, o chamado “*black rock*”. Assim, adicionou-se 1% de betume novo, perfazendo um total de ligante na mistura de 5,5%. A incorporação do PEBD na mistura destinou-se a substituir 6% da massa total de betume, contribuindo para uma redução da massa do betume novo adicionado e para a busca de um melhor desempenho mecânico.

No que diz respeito ao OAU, adicionou-se 18% da massa total de betume, isto é, considerando o conjunto do betume existente na MBR e do betume novo.

O estudo iniciou-se com o estabelecimento da composição das misturas e o fabrico dos provetes cilíndricos, seguindo-se a realização do Método de Marshall para recolha e análise das propriedades analisadas. Em seguida passou-se à avaliação da sensibilidade à água e da resistência à tração indireta por compressão diametral das misturas e, por fim, estudou-se a sua resistência à deformação permanente através de compressão uniaxial, com aplicação de cargas repetidas.

3.3.1 Fabricação dos provetes e aplicação do Método de Marshall

No processo de moldagem dos provetes cilíndricos, para o estudo Marshall, foi considerada para cada provete uma massa de cerca de 1200 gramas, tendo em consideração a capacidade da misturadora do laboratório, tendo-se fabricado quatro provetes por cada amassadura. Os provetes foram produzidos segundo a norma EN 12697-35. Para o fabrico dos provetes, os materiais utilizados foram acondicionados em duas estufas do seguinte modo: numa das estufas foram colocados a MBR durante 5 horas e o betume novo 35/50 a 165°C. Na outra estufa a temperatura utilizada foi de 185°C, tendo-se colocado no seu interior o agregado novo 4/16, os moldes cilíndricos para a compactação e os equipamentos da misturadora.

A massa da MBR, aquecida à temperatura de 165°C, foi vertida para a cuba da misturadora, onde se adicionado o OAU, o PEBD e o betume novo. Na mistura 85MBR o agregado novo 4/16 foi introduzido após a MBR e o OAU. Na figura 28 mostram-se aspetos do processo de produção das misturas.

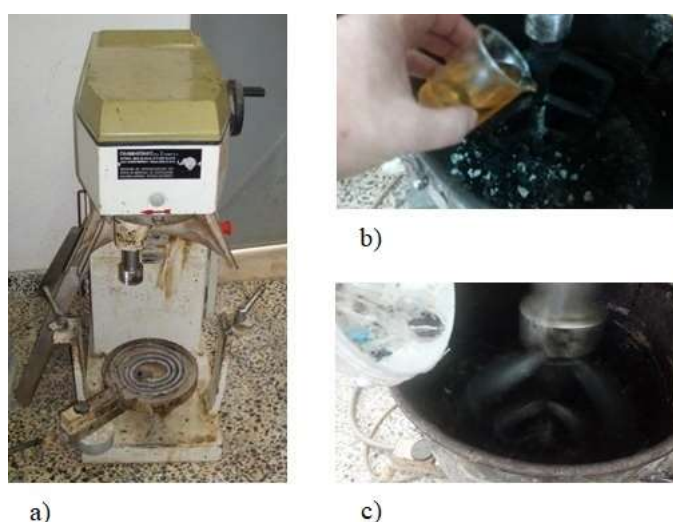


Figura 28– Produção da mistura: a) misturadora, b) adição do OAU, c) adição do PEBD

O material foi misturado durante aproximadamente 2,5 minutos. Após o processo de mistura, foi colocado na estufa, durante 30 minutos, de modo a permitir uma difusão mais homogênea do OAU e do plástico na mistura, a 165 °C.

Em seguida, o material foi colocado nos moldes cilíndricos para se realizar a compactação, tendo-se realizado a uma temperatura média de 165 °C e segundo o processo indicado na EN 12697-30, com a aplicação de 75 pancadas em cada face do provete. Na figura 29 estão representados os quatros provetes da mistura 100MBR.



Figura 29– Provetes Marshall da mistura 100MBR

3.3.2 Determinação da Baridade Aparente

O método utilizado para a determinação da baridade aparente foi o método B, descrito na norma EN 12697-6, ou seja, a baridade do provete saturado com a superfície seca. A determinação da baridade aparente faz-se pela equação 2:

$$\rho_{ssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ssd} é a baridade do provete saturado com a superfície seca;

m_1 é a massa do provete seco, ao ar (g);

m_2 é a massa do provete submerso (g);

m_3 é a massa do provete saturado com a superfície seca com um pano (g);

ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura do ensaio.

3.3.3 Ensaio de Compressão Marshall

O método de Marshall é um procedimento empírico utilizado para a formulação de misturas betuminosas. Apesar das suas limitações, é o método mais amplamente utilizado no mundo devido à sua simplicidade e larga experiência de utilização. No ensaio de compressão Marshall são obtidas a estabilidade e a deformação dos provetes das misturas. A norma EN 12697-34 refere que os provetes devem ser ensaiados num intervalo de 4 a 32 horas após o fabrico e a desmoldagem dos provetes.

Antes do ensaio, os provetes são submersos num tanque termostático, à temperatura de 60°C, durante um período de tempo de 40 a 60 minutos. Dentro deste tanque além dos provetes encontra-se o estabilómetro, peça metálica em meia cana que suporta os provetes durante o ensaio de compressão. Os provetes são retirados do tanque termostático, colocados no

estabilómetro e ensaiados (figura 30). Durante o ensaio, a base da prensa sobe a uma velocidade de 50,8 mm por minuto, fazendo reação numa viga de aço existente na parte superior. A estabilidade do provete é a força máxima que o provete suportou durante o ensaio, e a deformação representa a diminuição do seu diâmetro vertical que ocorreu durante a compressão.

A prensa dispõe de um software de aquisição de dados que gera um relatório, em função dos resultados do ensaio e levando em consideração a altura e a baridade aparente do provete ensaiado, para o software realizar a correção da estabilidade, de acordo com os procedimentos da norma EN 12697-34.

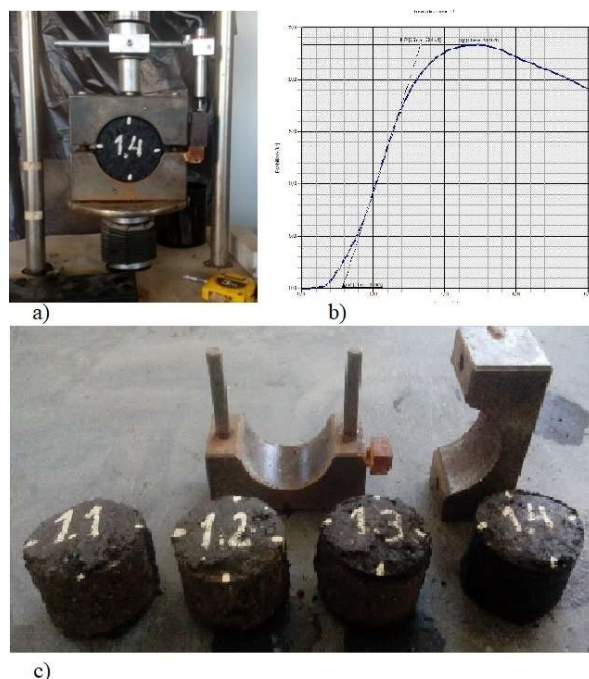


Figura 30– Ensaio de compressão Marshall: a) provete durante o ensaio b) gráfico gerado da variação da estabilidade com a deformação, c) provetes após o ensaio.

No quadro 9 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de compressão Marshall e as baridades aparentes de cada provete, para as duas misturas em estudo. No anexo J vêm representados os relatórios obtidos para a mistura 100MBR e 85MBR no estudo de compressão Marshall.

Quadro 9: Valores do estudo Marshall

	Provetes	Baridade Aparente (kg/m ³)	Estabilidade (kN)	Deformação (mm)	Deformação Tangencial (mm)	Rigidez Marshall (kN/mm)
100MBR	1.1	2377,1	23,6	2,8	1,8	8
	1.2	2338,6	24,2	3,2	1,7	7,3
	1.3	2348,7	26,1	4,1	2,5	6,4
	1.4	2331,7	25,3	3,8	2,2	6,2
	Média	2349,0	24,8	3,5	2,1	7,0
85MBR	1.5a	2313,7	21,4	2,8	1,4	7,5
	1.6a	2300,5	20,5	3,5	1,7	5,9
	1.7a	2300,6	19,1	3,9	2,4	5,2
	1.9a	2290,5	17,3	3,1	0,8	5,9
	Média	2301,3	19,1	3,3	6,3	6,1

3.3.4 Determinação da Baridade Máxima Teórica e da Porosidade

As determinações dos valores da baridade máxima teórica foram realizadas segundo a norma europeia EN 12697-5, pelo procedimento volumétrico. Após a compressão Marshall, os provetes ensaiados são colocados em tabuleiros, individualmente e colocados na estufa para secar, até se obter o valor de massa constante, sendo posteriormente a temperatura da estufa aumentada até aos 130°C para facilitar a desagregação manual do provete. Após a desagregação, o material é colocado no picnómetro de vácuo, sendo submetido a pressões negativas e a vibração, com o objetivo de extrair ar existente na mistura. Durante a fase de desagregação dos provetes, foi possível observar que nem todo o plástico (PEBD) se fundiu durante o processo de mistura (figura 31).



Figura 31– Determinação da baridade máxima teórica: a) mistura desagregada, b) mistura submetida ao vácuo no picnómetro, c) PEBD que não se fundiu no processo de mistura

O valor da baridade máxima teórica é determinado pela equação 3:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}} \quad (3)$$

Onde:

ρ_{mv} é a baridade máxima teórica (kg/m³);

m_1 é a massa do picnómetro completo (g);

m_2 é a massa do picnómetro completo com a amostra (g);

m_3 é a massa do picnómetro completo com a amostra e com água (g);

V_p volume do picnómetro (m³);

ρ_w é a massa volúmica da água a temperatura do ensaio (kg/m³).

A determinação da baridade máxima teórica é utilizada para se obter o valor da porosidade (V_m) da mistura e também o valor do vazios da mistura de agregado (VMA). A porosidade é determinada, por uma relação percentual, entre a baridade máxima teórica e a baridade aparente, sendo obtida pela equação 4:

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_{ssd}}{\rho_{mv}} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

V_m é a porosidade (%);

ρ_{ssd} é a baridade aparente do provete saturado com a superfície seca (kg/m³);

ρ_{mv} é a baridade máxima teórica (kg/m³).

No quadro 10 resumem-se os valores obtidos no estudo Marshall para ambas as misturas.

Quadro 10: Resumo dos resultados do estudo Marshall para as duas misturas (valores médios)

	Baridade Aparente (kg/m ³)	Estabilidade (kN)	Deformação (mm)	Porosidade (%)	VMA (%)
100MBR	2349	24,8	3,5	1,7	14,2
85MBR	2301	19,1	3,3	3,5	15,6

NOTA: para o cálculo do VMA foram considerados valores de 1030 kg/m³ para a densidade do betume e de 5,5% para a percentagem de betume na mistura.

3.3.5 Determinação da Sensibilidade à Água e da Resistência à Tração Indireta

Sendo a água um elemento que tende a provocar a degradação das misturas betuminosas, é necessário avaliar a suscetibilidade das misturas à ação daquele elemento. O estudo à sensibilidade à água foi realizado pelo método A descrito na EN 12697-12, realizando o ensaio de tração indireta segundo o procedimento descrito na norma EN 12697-23. Para aplicar o procedimento, produzem-se 6 provetes Marshall, determinando-se as suas baridades aparentes e as suas características geométricas (diâmetro e altura). São criados dois grupos, em que cada grupo é constituído por três provetes com características semelhantes. O grupo dos provetes acondicionados à temperatura ambiente foi designado ITS_{seco}, sendo o outro grupo constituído pelos provetes colocados num tanque termostático à temperatura de 40°C, designado ITS_{hum}.

A resistência à ação da água é medida pelo valor da designada resistência conservada em tração indireta (ITSR), que é uma relação percentual entre as resistências medidas para o grupo ITS_{hum} e para o grupo ITS_{seco}. Os provetes do grupo ITS_{hum} foram submetidos à aplicação de pressões negativas num picnómetro de vácuo (figura 32). Verificando-se que não existem variações volumétricas nos provetes, estes são colocados diretamente no tanque termostático, à temperatura de 40°C, durante um intervalo de tempo de 68 a 72 horas.

Terminado este período de tempo, os provetes do grupo ITS_{hum} são retirados do tanque termostático à temperatura de 40°C e colocados num tanque, onde a água se encontra a temperatura do ensaio (25°C), juntamente com os provetes do grupo ITS_{seco}, estando estes últimos protegidos com sacos de plástico, de modo a evitar o contacto da sua superfície com a água. Após 2 horas neste tanque realizou-se a compressão indireta dos provetes. O quadro 11 apresenta os valores médios obtidos. Nos anexos D e E apresentam-se os valores obtidos para os provetes das duas misturas em estudo na análise à sensibilidade a água.

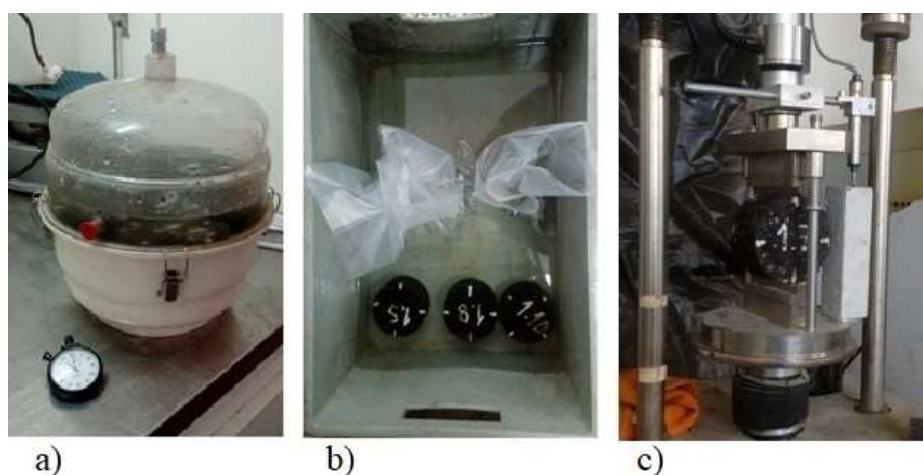


Figura 32– Estudo da sensibilidade à água: a) Provetes submetidos a pressão negativa, b) os dois grupos acondicionados à temperatura de ensaio 25°C, c) ensaio de tração indireta

Quadro 11: Resumo dos resultados do estudo da sensibilidade à água

	ITS (kPa)		ITSR (%)
	ITS _{hum}	ITS _{seco}	
100MBR	1169,5	1314,3	88,9
85MBR	645	600,7	107,4

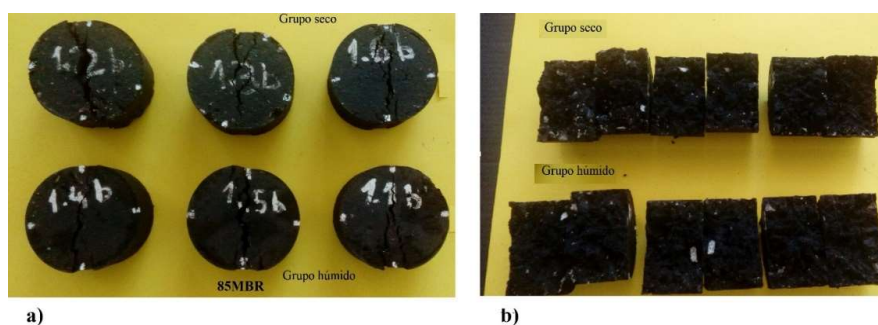


Figura 33– ITS a) Provetes após ensaio à tração indireta, b) visível a quebra dos agregados

Na figura 33 mostram-se os planos de rotura nos provetes da mistura 85MBR, sendo visível a quebra de alguns agregados.

3.3.6 Estudo da deformação permanente por compressão uniaxial

As camadas de desgaste estão sujeitas a temperaturas e pressões mais elevadas por contacto direto com os raios solares e por suportarem diretamente as cargas dos rodados dos veículos. Devido a estes fatores, estão sujeitas ao fenómeno da deformação permanente. Em países, como Portugal, em que o clima submete o pavimento a temperaturas elevadas, é importante um bom desempenho da mistura à deformação permanente.

Para estudar a resistência à deformação permanente pelo processo, de compressão uniaxial, foram produzidos 3 provetes cilíndricos para cada uma das misturas.

O processo de fabricação dos provetes cilíndricos, foram realizados em moldes metálicos, utilizados no ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*), moldes estes, com 150 mm de diâmetro. Para a vibro-compressão, utilizou-se um martelo de compactação, Kango 638, com uma frequência de 60Hz, em que foi adicionado mais 32 kg de massa. Sendo o provete compactado 1,5 minutos em cada uma das faces.

Na figura 34 mostram-se os equipamentos utilizados e os provetes obtidos.

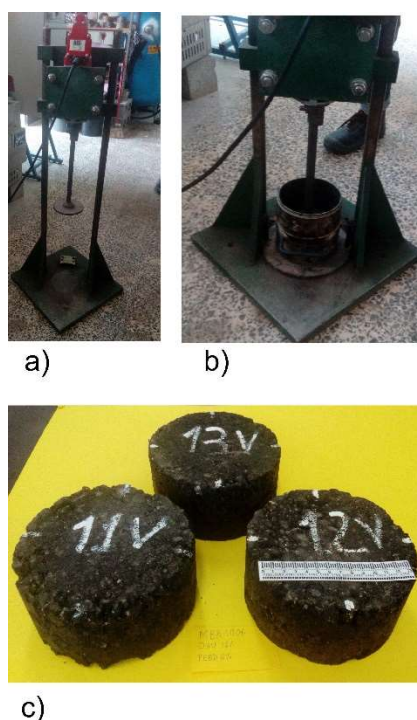


Figura 34— a) Martelo de vibro-compressão, b) Fabricação do provete; c) Provetes obtidos

O estudo da deformação permanente através da compressão uniaxial seguiu o procedimento descrito na norma europeia EN 12697-25 (Método A). O equipamento de ensaio é constituído por uma câmara climatizada dentro da qual se encontra a estrutura de carga e um atuador servo-pneumático alimentado por ar comprimido. O provete é colocado numa base cilíndrica, sendo depois aplicado sobre ele um prato metálico de carregamento, com diâmetro de 96 milímetros, onde atuam as cargas repetidas. O sistema aplica impulsos de carga e a deformação é medida por dois LVDT (transformador diferencial variável linear) aplicados sobre o prato metálico

superior (figura 35), sendo a variação da altura do provete registada pelo sistema de aquisição de dados.

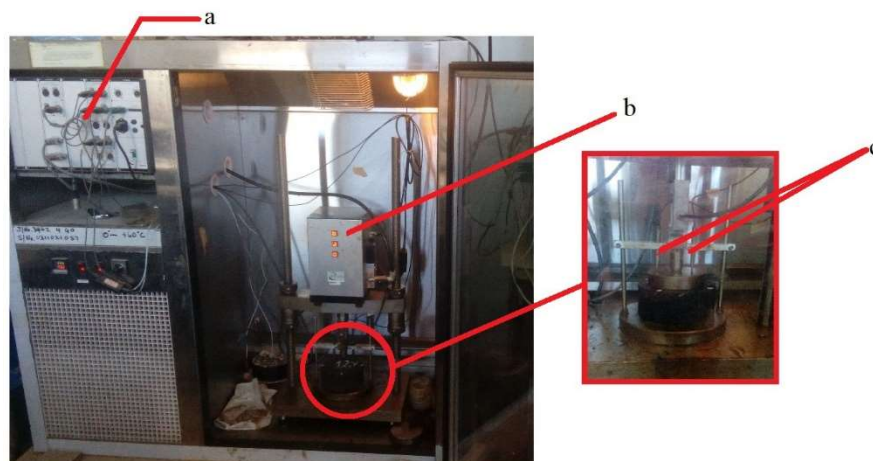


Figura 35– Equipamento de compressão Uniaxial: a) Sistema de aquisição de dados; b) Estrutura de carga; c) LVDTs

O ensaio tem uma duração de 2 horas e 10 minutos. Inicia-se com uma pré-carga de 10 kPa, durante 10 minutos. No ensaio propriamente dito aplicam-se impulsos de carga de 100 kPa, com 0,5 Hz de frequência, submetendo o provete a 1 segundo de carregamento e 1 segundo de repouso. O ensaio de compressão uniaxial termina após a aplicação de 3600 ciclos ou quando a deformação do provete atinge uma magnitude tão elevada que ultrapassa a capacidade de leitura do sistema. Neste estudo todos os provetes ensaiados atingiram 3600 ciclos de carga.

A norma EN 12697-25 determina que o provete deve estar submetido a um período de 4 a 7 horas dentro da câmara à temperatura do ensaio, antes do ensaio. Além disso, refere que a temperatura usual do ensaio é de 40°. Contudo, dada a realidade portuguesa, de temperaturas elevadas durante o verão, superiores a 50°C na camada superficial dos pavimentos em várias regiões do país, a temperatura utilizada para o ensaio foi de 60°C. O tempo de acondicionamento dos provetes na câmara foi de 4 horas, o tempo mínimo estipulado pela EN 12697-25. Deste modo conseguiu-se ensaiar 3 a 4 provetes num dia de trabalho.

O software do equipamento gera um relatório com os valores obtidos (anexos F e G) e um ficheiro de extensão csv, sendo depois este importado para um ficheiro de Excel.

Do ensaio de compressão uniaxial obtemos a extensão axial permanente acumulada (ϵ_N), após um determinado número de ciclos (relação deformação/altura do provete), que representa a deformação sofrida pelo provete durante o ensaio. Outro parâmetro que se mede no ensaio é a velocidade de deformação (f_c) que traduz o acréscimo de extensão que ocorre por ciclo de carregamento na zona quase linear da curva deformação – nº de ciclos. Nos ensaios em estudo, utilizou-se para a determinação do parâmetro f_c a deformação compreendida entre os ciclos 1800 e 3600.

No quadro 12 apresentam-se os valores obtidos para a deformação permanente e para a velocidade de deformação (f_c) das duas misturas. Na figura 36 representam-se graficamente as deformações obtidas para cada provete (extensão axial permanente acumulada e a deformação permanente).

Quadro 12: Resultados da compressão uniaxial

Provete		Deformação permanente (mm) Média		f _c (μm/m/ciclo) Média	
100MBR	1.1V	0,155	0,127	0,110	0,098
	1.2V	0,121		0,105	
	1.3V	0,105		0,084	
85MBR	85.a	0,243	0,480	0,169	0,185
	85.b	0,711		0,193	
	85.c	0,485		0,195	

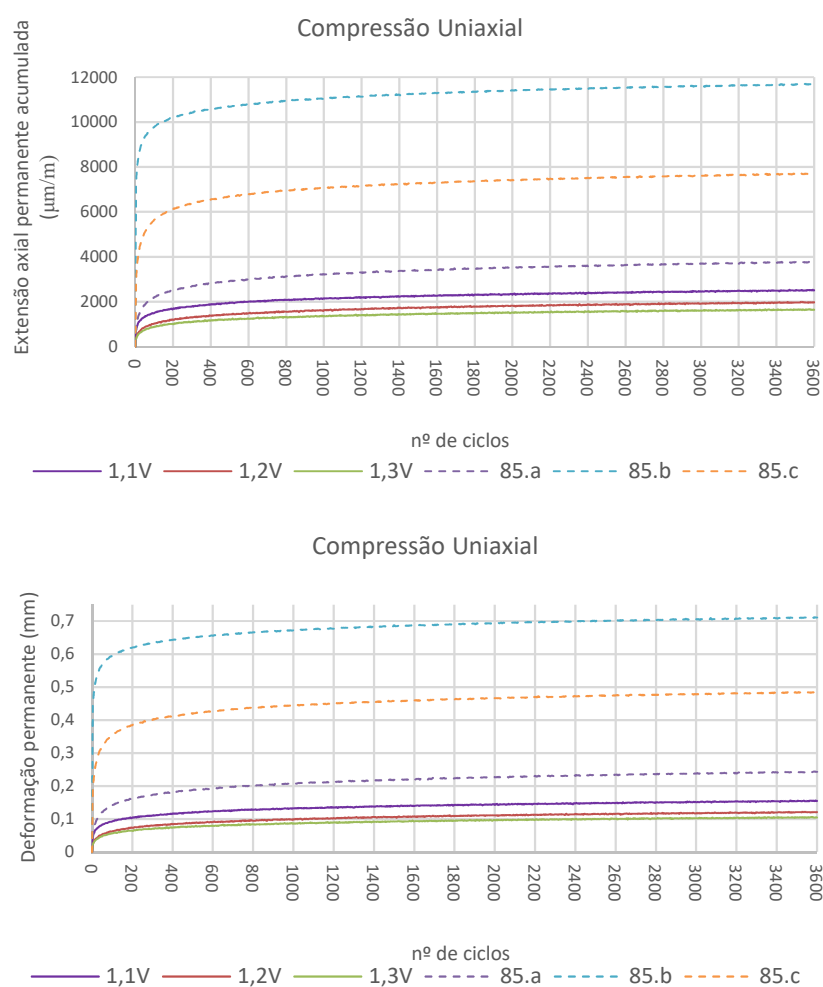


Figura 36: Representação gráfica da extensão axial permanente acumulada e da deformação permanente

3.4 Segunda fase do estudo

A segunda fase do estudo foi realizada no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do IST, em Lisboa. Fabricaram-se duas misturas, com as composições da 100MBR e da 85MBR, para a produção de lajes para avaliar a sua resistência à deformação permanente, através do ensaio de pista ou *wheel-tracking* (EN 12697-22), para medir o módulo de rigidez (EN 12697-26) e avaliar a resistência à fadiga (EN 12697-24), através do ensaio de flexão *four-point-bending* (4PB).

Para materiais de comportamento linear e elástico, o módulo de rigidez resulta de uma relação linear entre a tensão aplicada ao material e a deformação sofrida por este, a designada lei de *Hooke*. Contudo, como já foi mencionado, as misturas betuminosas têm um comportamento viscoelástico, pelo que o módulo apresenta geralmente uma relação não linear entre a tensão aplicada e a deformação sofrida. Além disso, para materiais com características viscoelásticas, ao aplicar-se uma tensão, o corpo deforma-se, mas uma vez removida a tensão o material recupera apenas parte da deformação sofrida. Para este tipo de materiais verifica-se também um desfaseamento entre as tensões aplicadas e as deformações sofridas, designado por ângulo de fase (Φ) (figura 37).

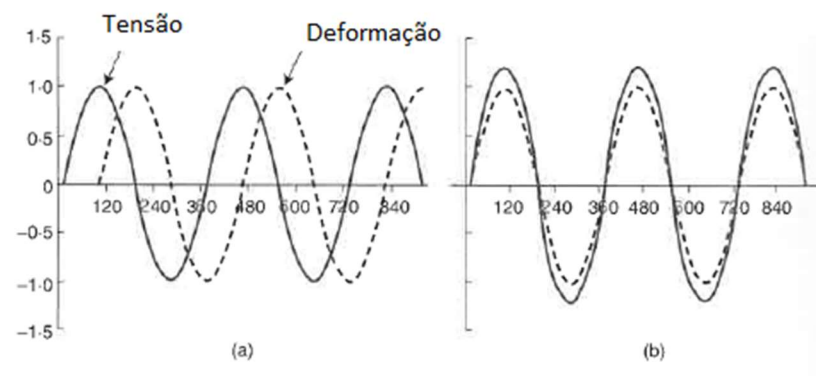


Figura 37- Comportamento reológico do material: a) viscoelástico; b) elástico (adaptado: Hunter, Robert (2003). *Asphalts in road construction*. London, Thomas Telford Publishing)

Num material perfeitamente elástico o ângulo de fase é zero porque quando cessa a aplicação da carga o intervalo de tempo para a recuperação da deformação sofrida é zero. No caso de um material puramente viscoso o intervalo de tempo de recuperação da deformação é alto, o ângulo de fase é de 90° . Na realidade os materiais têm um comportamento intermédio entre 0 e 90° . Na figura 38 representa-se o comportamento viscoelástico de um material.

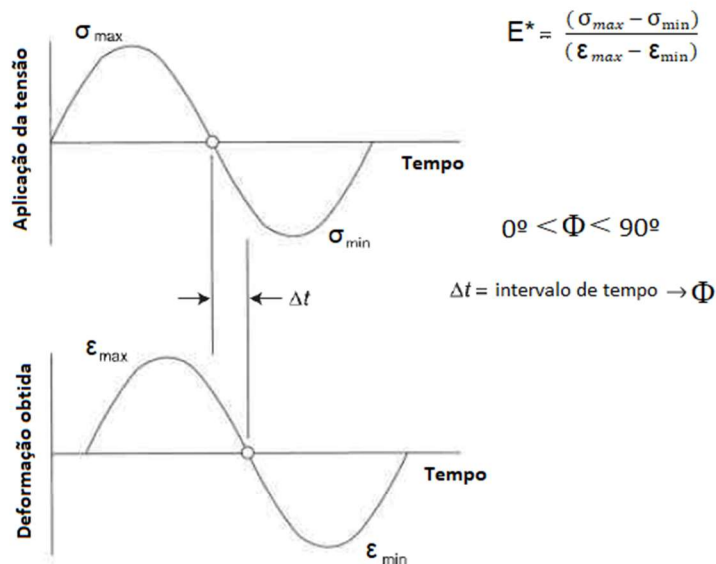


Figura 38-Comportamento viscoelástico do material (adaptado: Hunter, Robert (2003). *Asphalts in road construction*. London, Thomas Telford Publishing)

O módulo complexo (E^*) representa a resistência à deformação de um corpo quando submetido a uma tensão, num determinado intervalo de tempo e com uma determinada frequência. O módulo complexo é representado por duas componentes, representadas na equação 5:

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (5)$$

Onde:

E^* - Módulo complexo;

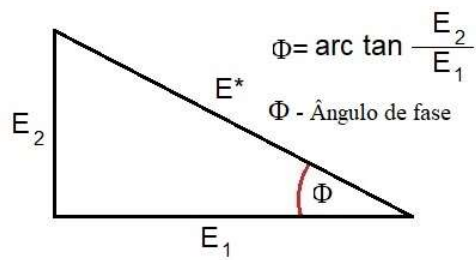
E_1 - Módulo elástico;

E_2 - Módulo viscoso;

i - número imaginário.

O módulo elástico (E_1) representa a quantidade de energia que o corpo consegue armazenar (e depois libertá-la) quando submetido a uma tensão; o módulo viscoso (E_2) representa a quantidade de energia perdida pelo corpo por atrito interno. Por vezes, E_1 , é designada por parte real do módulo complexo e E_2 por parte imaginária.

A relação entre estas duas componentes (E_1 e E_2) representa a tangente do ângulo de fase ($\tan \Phi$), tal como se mostra na figura 39. O ângulo de fase dá indicações sobre a prevalência do comportamento elástico ou viscoso.



E^* - Módulo complexo

E_1 - Módulo elástico ($E_1 = E \times \cos \Phi$)

E_2 - Módulo viscoso ($E_2 = E \times \sin \Phi$)

Figura 39- Representação das componentes do módulo complexo

O módulo de rigidez de um material ($|E^*|$) é dado pelo valor absoluto do módulo complexo, designado na EN 12697-26 por S_m , podendo definir-se pela equação 6:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (6)$$

Onde:

$|E^*|$ - Módulo de rigidez;

E_1 - Módulo elástico;

E_2 - Módulo viscoso.

A mistura produzida no IST foi realizada no equipamento representado na figura 40. Este equipamento possui um eixo horizontal rotativo, a capacidade de manter a mistura quente através de resistências de aquecimento internas, além de ter a capacidade volumétrica de produzir mistura para fabricar duas lajes.

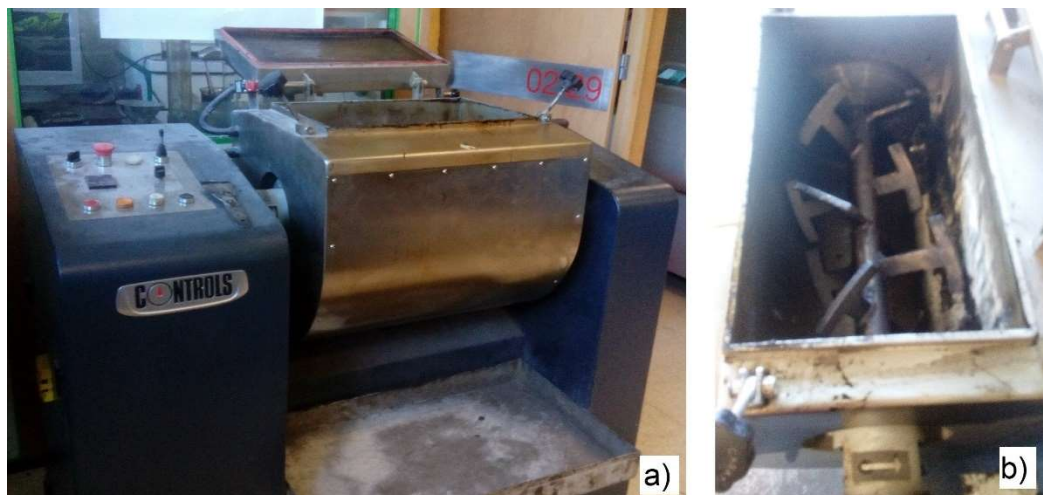


Figura 40- Misturadora utilizada no processo de fabricação das lajes: a) misturadora; b) eixo da misturadora

O procedimento utilizado para o fabrico da mistura foi semelhante ao descrito anteriormente, embora neste caso a fase de 30 minutos de interação entre os materiais tenha sido realizada dentro da misturadora, uma vez que este equipamento possuía a capacidade de manter a mistura quente. Na figura 41 ilustra-se o processo de produção da mistura.

O equipamento utilizado para moldagem e compactação das lajes foi o *Roller Compactor*, ilustrado na figura 42. Seguiu-se o procedimento indicado na norma EN 12697-33. O equipamento realiza a compactação do material por ciclos, durante um determinado período de tempo. Durante os ciclos em que se realiza a compactação, vai-se verificando um acréscimo do carregamento, terminando-se o processo quando a laje atinge a altura pretendida.

As dimensões das lajes moldadas para o estudo da deformação permanente foram 40x30x4 cm³, enquanto as lajes destinadas ao fabrico de vigas para o estudo da rigidez e resistência à fadiga tinham 40x30x5 cm³. Na figura 43 representa-se uma laje moldada no *Roller Compactor*.



Figura 41-Processo de fabricação da mistura

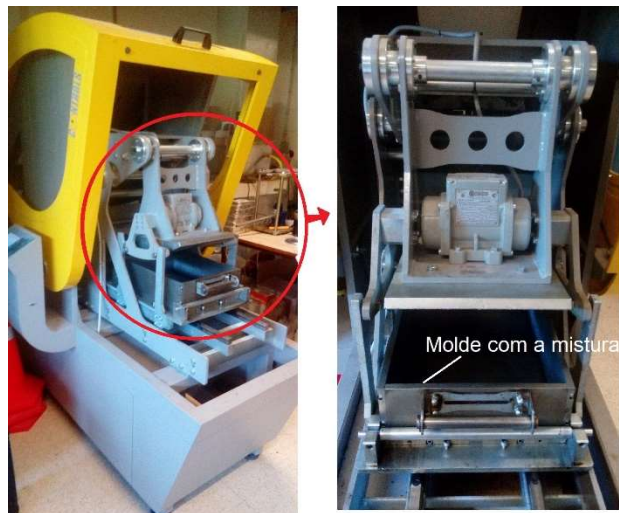


Figura 42-Equipamento Roller Compactor



Figura 43-Laje no molde, após o fim do processo de compactação

As lajes destinadas ao fabrico das vigas foram serradas com uma disco de corte mecânico (figura 44), determinando-se depois as suas dimensões e as bariedades aparentes. No anexo H apresentam-se as dimensões e as bariedades das 20 vigas produzidas no estudo.



Figura 44-Processo de serragem das lajes (esquerda) e as vigas obtidas (direita)

Na figura 45 estão representadas duas vigas, uma da mistura 85MBR e outra da mistura 100MBR, podendo observar-se o aspeto das seções serradas em cada uma das misturas. É visível a estrutura mais grosseira de agregados na mistura 85MBR pela introdução da fração 4/16 para reforçar o esqueleto pétreo.



Figura 45- Vigas das misturas 100MBR e 85MBR

3.4.1 Ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente pelo wheel-tracking

O ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente foi realizado com o equipamento de ensaio de pista ou wheel-tracking (figura 46), o qual consiste numa roda carregada que percorre longitudinalmente de trás para a frente, a parte central do provete (laje) instalado numa câmara climatizada, à temperatura de 60°C. Ao longo dos ciclos do ensaio é medida e registada a deformação sofrida pelo provete.



Figura 46– Equipamento Wheel-tracking

Utilizou-se o wheel-tracking de pequenas dimensões, descrito na norma da EN 12697-22, e o procedimento B (ensaio ao ar), ensaiando-se no mínimo 2 provetes para o estudo. Os provetes são acondicionados na câmara climatizada do equipamento, num período de 12 a 16 horas, antes de iniciar o ensaio. Este termina quando se atinge o limite de 10000 ciclos de carga ou a profundidade da rodeira, registada ao longo do ensaio, atinge 20 mm. Na figura 47 mostra-se a deformação sofrida pelas lajes durante o ensaio.



Figura 47– Lajes após o ensaio Wheel-Tracking (100MBR: 100.1, 100.2; 85MBR: 85.3, 85.4)

Os quadros 13 e 14 apresentam os resultados obtidos nos ensaios e a figura 48, representa as deformações sofridas pelas amostras durante o ensaio de deformação permanente.

Quadro 13: Resultados obtidos no ensaio wheel-tracking para as duas misturas

Mistura		RD _{air} (mm)	PRD _{air} (%)	WTS _{air} (mm/10 ³ ciclos)
100MBR	100.1	3,92	9,80	0,130
	100.2	3,93	9,83	0,110
85MBR	85.3	4,47	11,18	0,158
	85.4	2,75	6,88	0,132

O valor RD_{air} representa a profundidade da rodeira sofrida pelo provete até ao fim do ensaio, PRD_{air} representa o valor proporcional da rodeira, ou seja, a relação entre a deformação e a altura do provete. O valor de WTS_{air} representa a taxa de deformação média observada na parte linear da curva. Neste estudo considerou-se a parte quase-linear da curva deformação – número de ciclos compreendida entre os ciclos 5 mil e 10 mil. A equação 7 permite determinar a taxa de deformação média (mm/10³ ciclos):

$$WTS_{air} = \frac{d10000 - d5000}{5} \quad (7)$$

Onde:

WTS_{air} é a taxa de deformação média (mm/10³ ciclos);

d10000 é a profundidade da rodeira após 10000 ciclos (mm);

d5000 é a profundidade da rodeira após 5000 ciclos (mm).

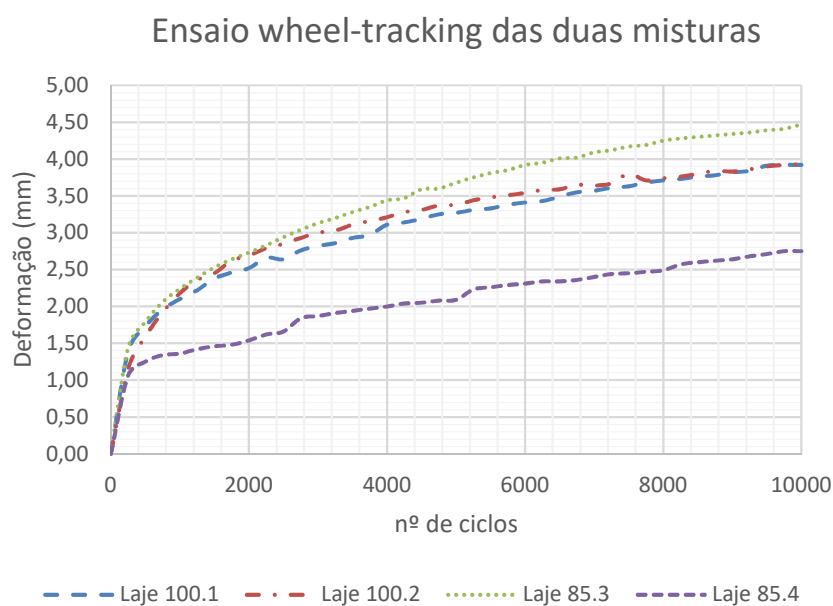


Figura 48- Resultados do wheel-tracking para as misturas 100MBR e 85MBR

Quadro 14: Valores médios dos resultados do wheel-tracking para as duas misturas

Mistura	RD _{air} (mm)	PRD _{air} (%)	WTS _{air} (mm/10 ³ ciclos)
100MBR	3,93	9,82	0,120
85MBR	3,64	9,03	0,145

3.4.2 Módulo de rigidez e resistência à fadiga

Os ensaios de rigidez e de avaliação da resistência à fadiga foram realizados no equipamento 4PB, ilustrado na figura 49. As vigas a ensaiar foram acondicionadas no equipamento que se encontra instalado dentro de uma câmara climatizada, à temperatura de 20°C. Os ensaios foram realizados segundo o procedimento indicado na norma EN 12697-26.



Figura 49 –Equipamento four-point-bending

Os provetes prismáticos a ensaiar, simplesmente apoiados nas suas duas extremidades, são submetidos a um esforço de flexão periódico, resultante de duas cargas concentradas aplicadas

em dois pontos na parte central do provete. As cargas variam no tempo de forma sinusoidal, tendo-se aplicado uma amplitude de extensão de $50\mu\text{m/m}$, para cada uma das seis frequências consideradas. As frequências utilizadas foram as seguintes: 1, 3, 5, 10, 20 e 30 Hz. A frequência aplicada representa o tempo de carregamento e este a velocidade média de circulação dos veículos. Quanto maior a frequência maior é velocidade de circulação que se pretende simular. A temperatura utilizada no ensaio foi de 20°C , apesar de ser uma temperatura de serviço, inferior às que se verificam em Portugal, é a mais utilizada em trabalhos pelo mundo (Martinho, 2014).

Na figura 50 apresentam-se os resultados das baridades aparentes das vigas ensaiadas.

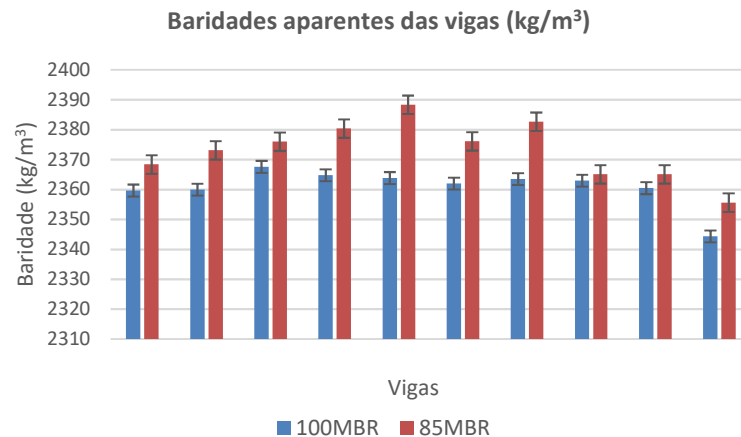


Figura 50: Baridades aparentes das vigas

Os resultados obtidos nos ensaios das vigas são traduzidos nos valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase, representados graficamente na figura 51. Nos anexos I e J apresentam-se os resumos dos resultados obtidos, para o ângulo de fase e para o módulo de rigidez, das 20 vigas ensaiadas.

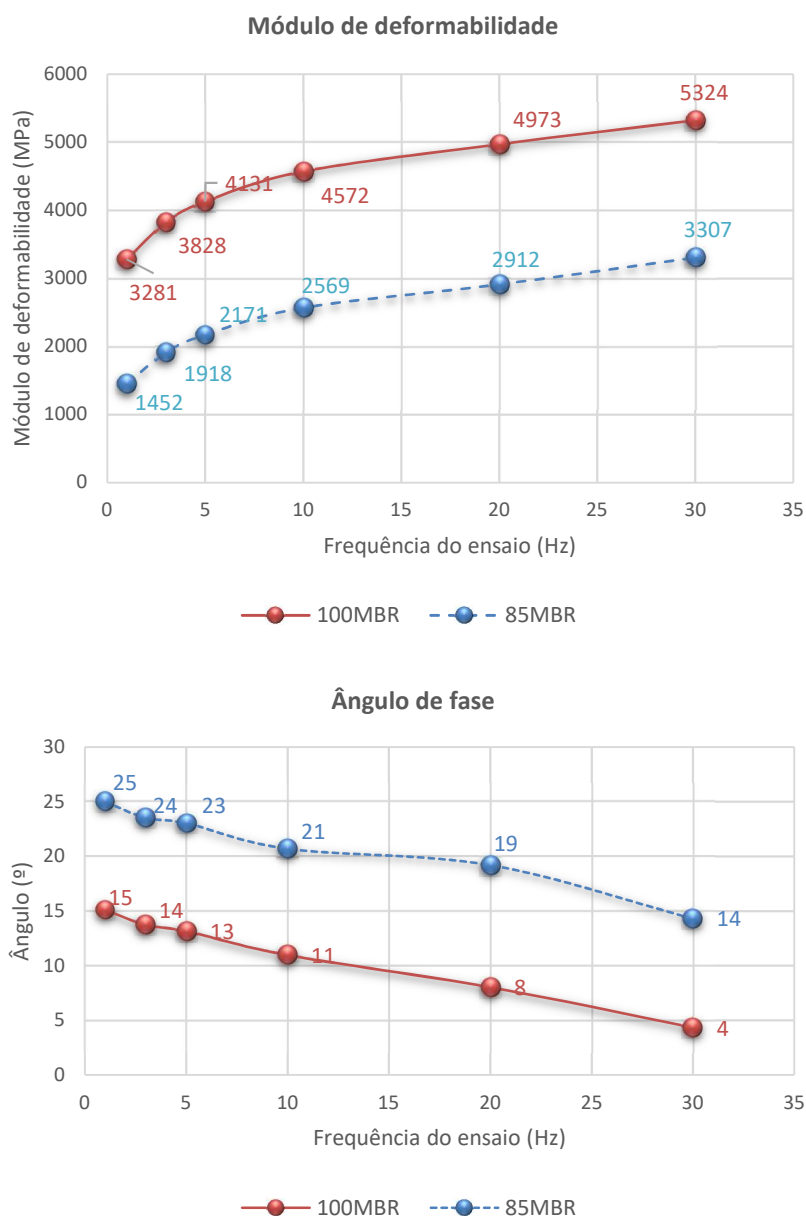


Figura 51 - Representação do módulo de rigidez e do ângulo de fase para as misturas em estudo

O estudo da resistência à fadiga foi realizado segundo a norma EN12697-24, na qual se utilizaram 3 níveis de extensões, tendo-se aplicado cargas com variação sinusoidal e com uma frequência de 10 Hz. As vigas da mistura 100MBR foram ensaiadas para os seguintes níveis de extensão: 200, 300 e 400 $\mu\text{m}/\text{m}$. As da mistura 85MBR foram testadas para os níveis de extensão 300, 400 e 500 $\mu\text{m}/\text{m}$, de modo a reduzir a duração dos ensaios. Considerou-se para critério de paragem do ensaio a redução de 50% do módulo de rigidez inicial. No quadro 15 apresentam-se os resultados dos ensaios de fadiga.

As leis de fadiga obtidas correspondem à representação dos resultados através da equação 8, permitindo, deste modo, avaliar o desempenho das misturas relativamente à resistência à fadiga.

$$\varepsilon = a \times N^{-b} \quad (8)$$

Onde:

ε - extensão para o ciclo N;

a- ordenada na origem na equação $\log(N) = a + (1/b) \log(\varepsilon)$;

b- inverso do declive da reta.

O parâmetro ε_6 corresponde à extensão necessária para que a vida do provete seja de 1 milhão de ciclos de carga, sendo o valor daquele parâmetro determinado a partir da lei de fadiga que se obtém do ajuste, por regressão, dos resultados obtidos no ensaio à equação 8.

Quadro 15 - Valores obtidos no estudo à fadiga para as vigas ensaiadas

Misturas	Vigas	Extensão aplicada ($\mu\text{m/m}$)	Número de ciclos	Módulo Inicial (MPa)
85MBR	V1	300	3 364 349	1920
	V4	300	3 463 681	2061
	V7	300	1 638 876	2149
	V3	400	819 988	1716
	V6	400	540 001	1709
	V9	400	191 591	1894
	V2	500	47 429	1801
	V5	500	57 767	1602
	V8	500	118 296	1632
100MBR	B3	200	3 198 133	4686
	B5	200	1669 104	4237
	B8	200	1 829 458	3929
	B4	300	71 295	4208
	B7	300	114 850	4358
	B1	300	194 939	4092
	B6	400	20 596	3277
	B2	400	32 621	4031
	B9	400	4 013	2873

Os valores obtidos para ε_6 são os apresentados no quadro 16, mostrando-se na figura 52 as leis da fadiga para as misturas em estudo.

Quadro 16- Valores de ε_6 determinados para as duas misturas em estudo

	ε_6 ($\mu\text{m/m}$)
100MBR (100% MBR+18% OAU+ 6% PEBD+1% betume novo)	228
85MBR (85% MBR+15% agregado novo+18% OAU+ 6% PEBD+1% betume novo)	353

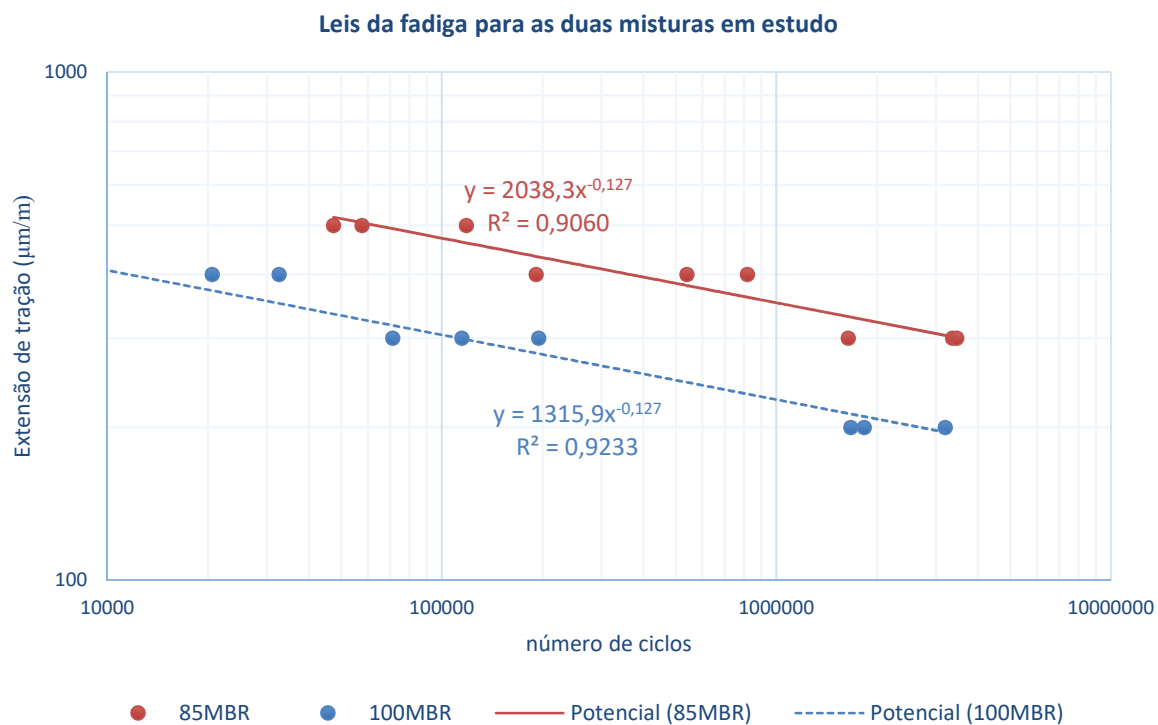


Figura 52 – Leis da fadiga para as misturas em estudo, 100MBR e 85MBR

4 Comparação das Características das Misturas em Estudo com as Obtidas em Estudos Similares

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo faz-se a comparação dos resultados obtidos para as duas misturas em estudo com outras estudadas anteriormente, de modo a analisar os resultados obtidos. Tomam-se para comparação as misturas estudadas por Fernandes (2018), Fonseca (2018) e Almeida et al (2019).

No quadro 17 apresentam-se as composições das misturas em estudo e as misturas utilizadas na comparação.

Quadro 17- Composição das misturas betuminosas em estudo

Mistura	% de MBR	% de agregado novo	% de OAU	% de PEBD	% de betume novo	% Total de betume novo
100MBR	100	0	18	6,0	1,0	5,5
85MBR	85	15	18	6,0	1,5	5,5
Fernandes (2018)	100	0	18	0	1,0	5,5
Fonseca (2018)* AC 14	0	100	0	0	5,0	5,0
Fonseca (2018) AC 14 com 6% PEBD**	0	100	0	6	5,0	5,0
Almeida et al (2019) AC 14 com 6% PEBD**	0	100	0	6	5,0	5,0

* mistura tradicional: 15% de agregado granítico 8/10, 36,4% de agregado granítico 4/12, 45,6% de pó calcário e 3% de filer

** mistura: 15% de agregado granítico 8/10, 36,4% de agregado granítico 4/12, 45,6% de pó calcário e 3% de filer, 6% PEBD como substituto da massa de betume

4.2 Análise dos resultados obtidos

4.2.1 Estudo Marshall e sensibilidade à água das misturas

Os resultados obtidos no ensaio de Marshall e para o estudo da sensibilidade à água para as misturas 100MBR e 85MBR vêm representados no quadro 18.

A mistura 100MBR apresentou valores da baridade e estabilidade mais elevados que a mistura de Fernandes, sendo as deformações próximas. Tratando-se de misturas com elevada percentagem de MBR e ambas com OAU, as diferenças observadas nos resultados estarão relacionadas com a heterogeneidade da MBR utilizada como constituinte, o que pode resultar num esqueleto pétreo diferente e/ou numa quantidade de ligante envelhecido que é ativada também de forma diferente.

Quadro 18: Resumo comparativo do estudo Marshall e da sensibilidade à água

	100MBR		85MBR		Fernandes (100MBR sem PEBD)		Fonseca (AC 14 c/ 6% PEBD)		Fonseca (AC 14)	
Baridade (kg/m ³)	2353,4		2293,6		2208,3		2411,5		2399,5	
Estabilidade (kN)	24,8		19,1		13,6		20,8		14,0	
Deformação (mm)	3,5		3,3		3,0		3,7		4,0	
Porosidade (%)	1,7		3,5		baixa		1,9		3,3	
	seco	imerso	seco	imerso	seco	imerso	seco	imerso	seco	imerso
Tração indireta ITS (kPa)	1314,3	1169,5	600,7	645,0	2392,2	2499,1	1659,8	1439,9	1373,9	1501,6
ITSR (%)	89,0		107,4		104,0		86,8		109,3	

Releva-se dos resultados obtidos para a 100MBR e a 85MBR a observação de valores de estabilidade altos e de deformação abaixo de 4 mm. Este é habitualmente considerado o limite nos cadernos de encargos da administração rodoviária portuguesa. Além disso, a correção da granulometria da MBR com agregado grosso, 4/16, levou a que a mistura 85MBR tivesse uma porosidade próxima de 4% e, por isso, fosse mais consentânea com a prática tecnológica habitual no país. Comparando os resultados da estabilidade obtidos para as misturas em estudo com os valores obtidos por Fernandes (2018), observa-se um aumento de cerca de 80% no valor da estabilidade Marshall pela incorporação de PEBD nas misturas. Embora menos expressiva, esta tendência tinha sido já observada por Fonseca (2018) para misturas convencionais sem MBR.

No que se refere à resistência à tração indireta (ITS), as misturas 100MBR e 85MBR revelaram valores inferiores em comparação com os resultados de Fonseca e de Fernandes. Note-se, contudo, que a temperatura de acondicionamento dos provetes utilizada por Fernandes foi de 15°C, enquanto que no estudo de Fonseca e para as misturas em estudo se adotou 25°C. É a temperatura de ensaio que explica o abaixamento dos valores de ITS face aos medidos por Fernandes. Já em comparação com Fonseca (0% de MBR e 6% de PEBD), a mistura em estudo, 100MBR, com OAU e com PEBD, apresentou valores de ITS cerca de 20% inferiores e um ITSR um pouco inferior, embora superior a 80%. A mistura 85MBR apresentou um valor de ITS bastante baixo, da ordem de 45% do valor da 100MBR. O parâmetro ITSR configura uma boa resistência das misturas à ação da água, mas a mistura 85MBR mostrou uma fraca resistência à tração indireta, em termos relativos.

Comparando os valores das duas misturas em estudo, a 100MBR apresentou baridades aparentes superiores relativamente à mistura 85MBR e valores de porosidade baixa, inferior a 3%, valor mínimo estabelecido pelo Cadernos de Encargos Tipo Obra da Infraestruturas de Portugal.

O tempo e a temperatura de mistura utilizados permitiram a produção de misturas que, por inspeção organolética, aparentavam ser homogéneas. Contudo, no caso da mistura 85MBR, por ter sido introduzida uma maior quantidade de betume novo (1,5% em vez de 1%) e uma parcela de 15% de agregado novo 4/16, o envolvimento dos agregados novos pelo betume e a interação do betume envelhecido com o OAU pode ter sido insuficiente. Além disso, a correção do traçado da curva granulométrica da 85MBR, embora tornando o esqueleto pétreo mais grosseiro, levou a que o traçado da curva não seguisse o do fuso em toda a extensão. Embora não tenha sido possível estudar este aspeto em particular, é possível que a existência de um

esqueleto pétreo menos estável para suportar esforços de tração indireta tenha conduzido aos resultados observados.

4.2.2 Estudo da resistência à deformação permanente das misturas

O estudo das misturas em relação ao fenómeno da deformação permanente foi realizado através do ensaio de compressão uniaxial (EN 12697-25) e do ensaio de wheel-tracking (EN 12697-22). No primeiro caso, os resultados obtidos foram comparados com os obtidos por Fonseca para uma mistura AC 14 surf 35/50 convencional e para outra com 6% de PEBD. No caso do ensaio de wheel-tracking, os resultados foram comparados com os desempenhos obtidos pelas misturas de Fernandes (100% de MBR) e por Almeida et al (2019), tendo sido estudados neste último caso um AC 14 surf de referência (mistura convencional) e um AC 14 surf com 6% PEBD.

Como se pode observar em 3.4.1, os resultados obtidos no ensaio de pista para a mistura 100MBR mostram que os valores das duas lajes ensaiadas foram próximos, com uma diferença de cavado de rodeira (RD_{air}) entre elas de apenas 0,01 mm. No caso da mistura 85MBR o traçado do gráfico deformação–número de ciclos de carga medido para as duas lajes ensaiadas é bastante distinto, tendo-se observado uma diferença de 1,72 mm para RD_{air} entre as duas lajes.

Na Figura 53 compararam-se os resultados do ensaio de wheel-tracking obtidos para as misturas analisadas.

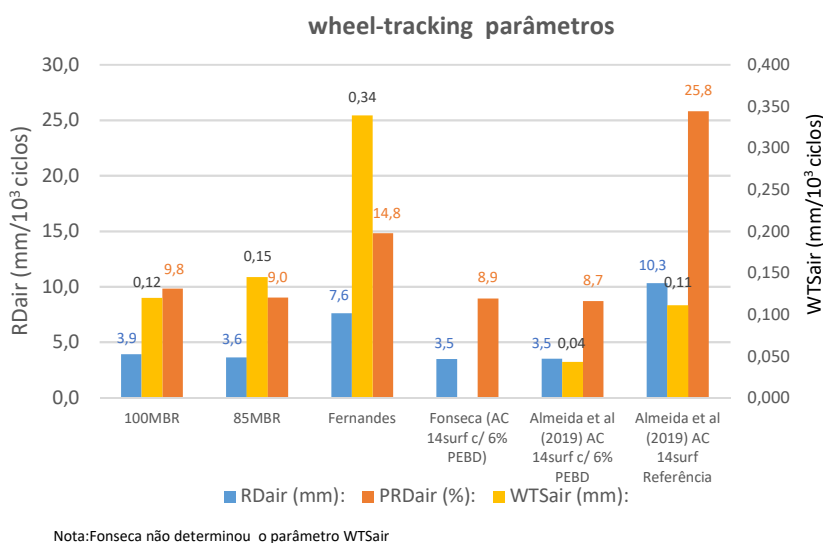


Figura 53-Parâmetros obtidos no ensaio de Wheel-Tracking para as misturas em comparação

Os valores médios de RD_{air} são próximos para as misturas 100MBR e 85MBR (diferença de 0,29 mm), o mesmo se verificando para WTS_{air} . O valor de PRD_{air} apresentou uma discrepância maior entre as duas lajes da mistura 85MBR, embora o valor médio tenha sido próximo do determinado para a 100MBR. A introdução de agregado grosso novo na mistura 85MBR, com o intuito de reforçar o esqueleto pétreo, não resultou numa melhoria sensível da resistência à deformação permanente, provavelmente por ter havido um efeito contrário causado pela adição de mais betume novo. O agregado novo adicionado, 4/16, não favoreceu a criação de um mástique mais resistente a temperaturas elevadas, o que pode explicar estes resultados. Pela análise destes resultados, a mistura 100MBR comportou-se de forma razoável, tendo apenas

mais 0,29 mm de deformação que a 85MBR, mas com a vantagem de ser uma solução com menos betume novo e sem agregado de correção.

No ensaio de wheel-tracking, ambas as misturas, 100MBR e 85MBR, obtiveram melhores desempenhos que a mistura 100MBR sem PEBD de Fernandes (figura 53), e valores próximos aos obtidos Almeida et al (2019) para um AC14 com PEBD quando se considera o parâmetro RD_{air} . Sendo a composição comparável à utilizada por Fernandes, embora nesse caso não tenha sido incorporado PEBD, pode afirmar-se que a adição de 6% de PEBD contribui para uma melhoria do desempenho à deformação permanente do material, quer quando se utilizou MBR na composição da mistura quer quando os constituintes foram integralmente novos.

Como se observa na figura 54, no ensaio de compressão uniaxial a mistura 100MBR obteve um valor médio de deformação permanente inferior ao da mistura AC14 surf com 6% de PEBD produzida por Fonseca (2018) mas a 85MBR revelou um valor superior à mistura AC14 convencional estudada naquele trabalho.

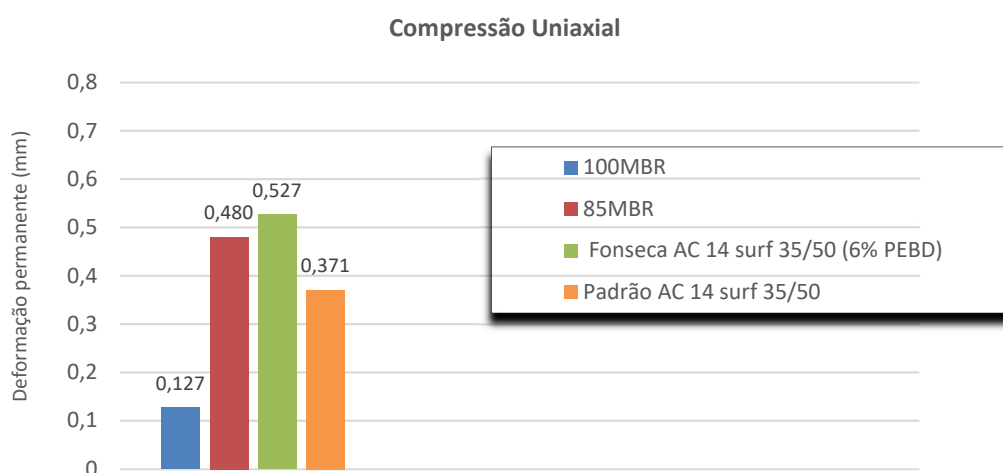


Figura 54: Valores comparativos da deformação permanente para as misturas em comparação

No caso da mistura 85MBR, tal como aconteceu nos ensaios de wheel-tracking, os ensaios de compressão uniaxial apresentaram dispersão nos valores da deformação permanente. Seria importante para uma melhor análise dos resultados ter sido possível realizar e ensaiar novos provetes cilíndricos para a compressão uniaxial. Note-se que alguns provetes cilíndricos da mistura 85MBR, compactados por vibro-compressão, apresentaram valores elevados de porosidade, o que pode estar na origem das deformações medidas. No quadro 19 ilustra-se a variação da baridade e da porosidade em função do método de moldagem e compactação dos provetes. De salientar que a porosidade das lajes de wheel-tracking, embora não tenham sido determinadas, foram compactadas pelo mesmo processo que as vigas, pelo que os valores de porosidade serão semelhantes.

Parece ser a diferença do método de fabrico dos provetes que explica a não concordância de resultados de avaliação da resistência à deformação permanente através de ensaios de wheel-tracking e de compressão uniaxial. Será necessário prosseguir os estudos para que, realizando

ambos os tipos de ensaios sobre provetes com propriedades volumétricas mais próximas, obter maiores certezas sobre as tendências observadas.

Quadro 19- Representação de baridades e porosidades para as misturas, consoante o método de fabricação dos provetes

Estudo	Mistura	Baridade Aparente (kg/m ³)	Rácio Baridade (%)	Porosidade (Vm) (%)
Marshall	100MBR	2349	100,2	1,7
	85MBR	2301		3,5
Sensibilidade água	100MBR	2328	101,5	ND
	85MBR	2293		ND
Compressão Uniaxial	100MBR	2280	101,9	4,0
	85MBR	2238		10,6
Vigas	100MBR	2361	98,9	1,7
	85MBR	2386		2,9

ND - não determinado

4.2.3 Estudo do módulo de rigidez das misturas

Após a realização do estudo da rigidez das misturas, através da determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase das 20 vigas ensaiadas, realizou-se a comparação dos resultados obtidos nas duas misturas (100MBR e 85MBR), com os resultados obtidos por Fernandes (2018) e por Almeida et al (2019). Na figura 55 representam-se os valores obtidos para as duas misturas em estudo e os valores obtidos nos outros estudos.

Os resultados obtidos por Almeida et al (2019) mostraram que a introdução de 6% de PEBD no AC 14 surf de referência contribuíram para aumentar os módulos de rigidez e reduzir os ângulos de fase. Esta tendência não foi completamente observada no caso da mistura 100MBR quando se comparam os resultados obtidos com os de Fernandes (2018) cuja composição é semelhante embora sem incorporar PEBD. De facto, verifica-se que a mistura 100MBR apresenta ângulos de fase consideravelmente mais baixos, mas os valores do módulo de rigidez são também mais baixos.

No que diz respeito à mistura 85MBR, esta apresenta valores superiores de ângulo de fase em comparação com os obtidos por Fernandes (neste caso, sem constituintes novos), mas para frequências até 8Hz revelou valores inferiores aos das misturas novas estudadas por Almeida et al. (2019), com e sem PEBD. Os resultados parecem mostrar que a maior parcela de betume novo na mistura face ao total de ligante, contribuiu significativamente para a redução dos módulos, quer face à 100MBR quer em relação às restantes misturas em comparação. Ao mesmo tempo, observou-se um comportamento menos elástico que as restantes misturas que continham MBR. A incorporação de PEBD parece ter menos influência nos resultados que a introdução de betume e agregados novos na 85MBR.

Verificou-se que a introdução de PEBD nas misturas 100MBR em substituição de parte do betume conduziu a uma redução do módulo, por exemplo, para a frequência de 10 Hz de cerca de 25%, de 6000 MPa (Fernandes) para cerca de 4600 MPa (100MBR).

Em misturas betuminosas convencionais a quente, geralmente, o aumento do módulo de rigidez é acompanhado pelo decréscimo do ângulo de fase. No caso em estudo, observou-se

essa tendência comparando os resultados das misturas 100MBR e 85MBR. Contudo, em comparação com a mistura de Fernandes (2018), a 100MBR, não mostrou a mesma tendência, uma vez que os módulos destas são menores que os medidos por Fernandes, ao mesmo tempo que os ângulos de fase são também menores.

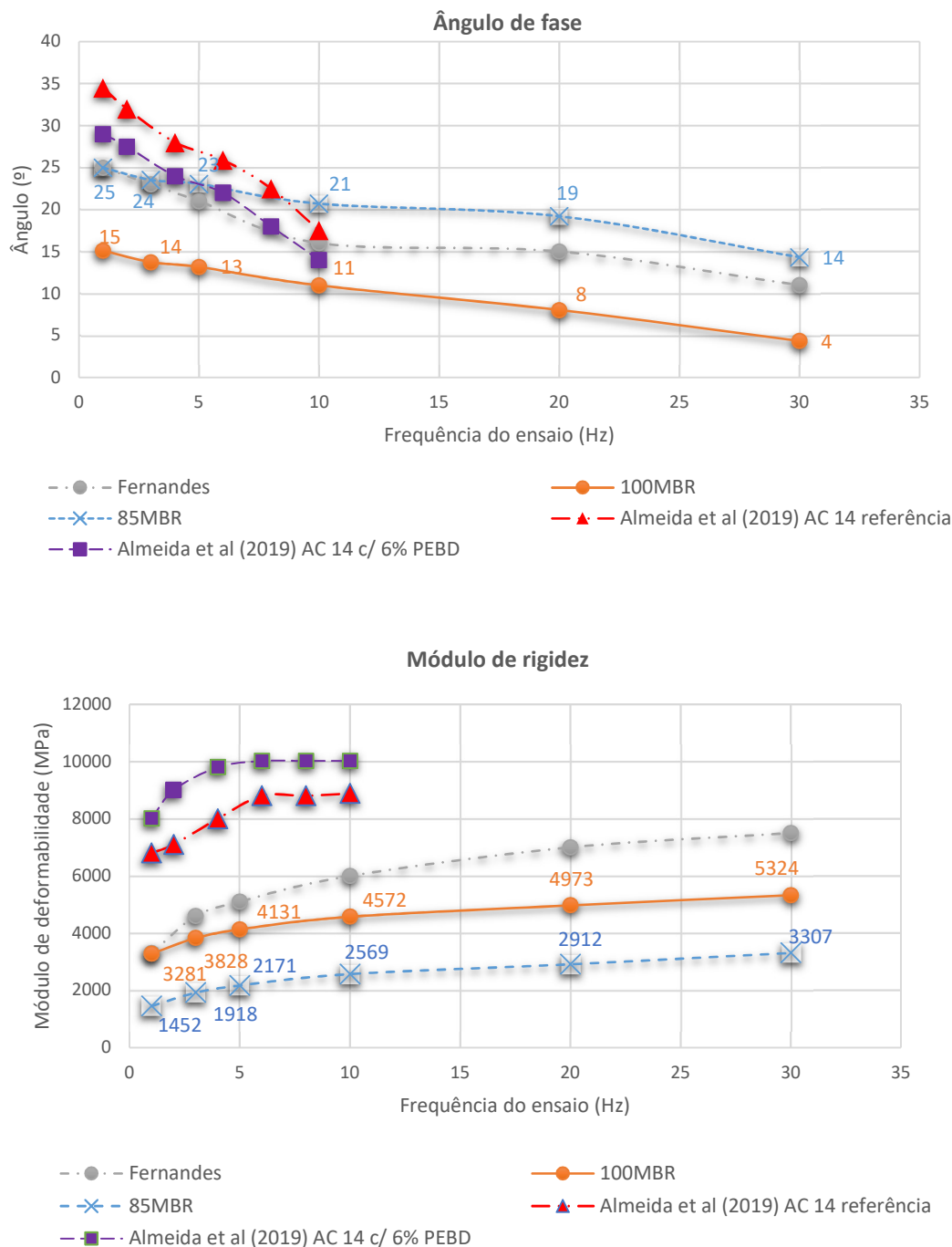


Figura 55: Comparação do ângulo de fase e do módulo de deformabilidade

Um dos contributos para a variação observada para estes resultados é a variabilidade entre os lotes de MBR utilizados para produzir os provetes. Apesar da MBR utilizada nas duas fases de estudo ter sido recolhida por fresagem da camada de desgaste de um trecho da autoestrada A23, o lote utilizado por Fernandes (2018) tinha uma granulometria mais grosseira na parte fina dos agregados (anexo K). As lajes produzidas para a determinação dos módulos de rigidez das

misturas em estudo foram fabricadas com MBR proveniente de um lote de granulometria um pouco mais fina. Sendo a MBR composta por material um pouco mais fino, é provável que a fração mais fina contenha maior percentagem de betume, o que terá produzido um mástique mais rico em ligante, originando módulos mais baixos, apesar da substituição de parte do betume por PEBD.

No caso da mistura 85MBR, a adição de uma maior percentagem de betume novo para perfazer a percentagem total de 5,5% de ligante, terá contribuído para um maior rejuvenescimento do betume envelhecido da MBR, levando a uma maior redução dos valores do módulo de rigidez face aos valores de Fernandes.

No que diz respeito ao ângulo de fase, os valores obtidos por Fernandes são mais elevados que os medidos para a mistura 100MBR, o que não corresponde à variação que poderia esperar-se, tendo em conta os valores dos módulos de rigidez. A existência na mistura de PEBD como agente modificador do ligante é suscetível de originar um comportamento mais elástico na 100MBR face à mistura de Fernandes, semelhante em composição, mas sem PEBD. Apesar da incorporação de PEBD, o qual tenderia a baixar o ângulo de fase, a maior riqueza em ligante não envelhecido e a existência provável de um mástique também mais rico em ligante poderão explicar o seu comportamento mais viscoso.

Comparando os resultados das variáveis módulo de rigidez e ângulo de fase obtidos por Fernandes e para 100MBR, verifica-se que para o mesmo valor de módulo, a 100MBR tem cerca de menos 13° de ângulo de fase que a mistura de Fernandes. Considerando o mesmo ângulo de fase, a mistura 100MBR tem valores de módulo de rigidez cerca de 3000 MPa mais baixos que a mistura de Fernandes.

Na figura 56 representa-se a relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase das misturas em estudo.

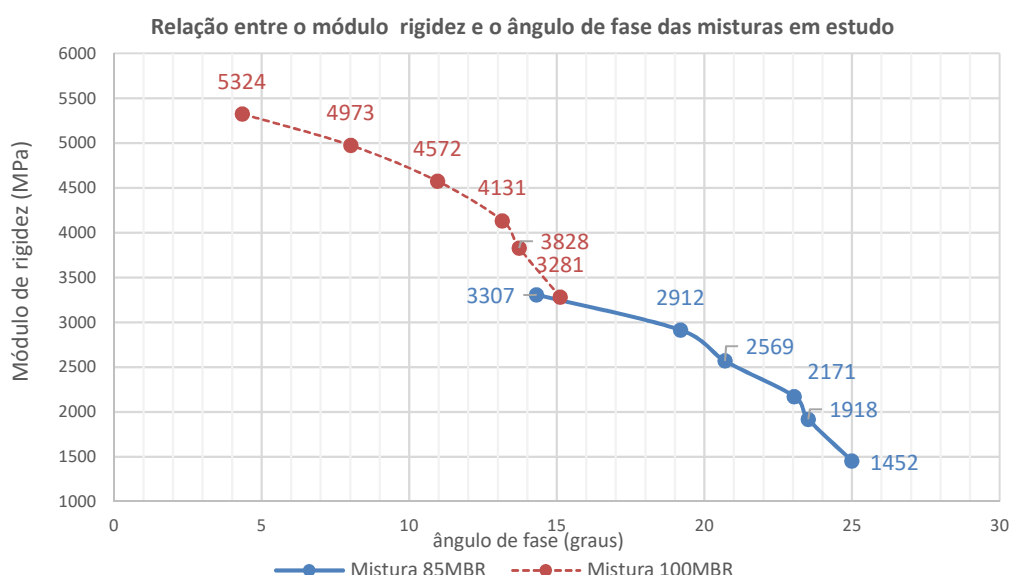


Figura 56-Relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase das misturas em estudo

Pela observação do gráfico da figura 56, as duas misturas têm um comportamento bastante distinto. Apenas para valores do ângulo de fase próximos de 15°, o módulo de rigidez está

próximo de 3300 MPa para as duas misturas, embora tenham sido obtidos para frequências de carregamentos distintas (1 Hz para a 100MBR e 30 Hz para a 85MBR).

4.2.4 Estudo da resistência à fadiga das misturas

Para o estudo da resistência à fadiga foram ensaiadas 9 vigas para cada uma das misturas. A mistura 100MBR obteve para uma vida de 10^6 ciclos (ϵ_6) uma extensão de 228 $\mu\text{m/m}$, valor inferior ao obtido por Fernandes (252 $\mu\text{m/m}$) para uma composição comparável com a 100MBR sem PEBD, mas superior ao valor de 122 $\mu\text{m/m}$ obtido por Almeida et al (2019) para um AC14 com 6% de PEBD. Ou seja, a mistura 100MBR consegue uma resistência à fadiga quase duas vezes superior à do AC 14 surf com 6% de PEBD de Almeida et al. (2019).

Quanto à mistura 85MBR, esta obteve uma extensão de 353 $\mu\text{m/m}$ para uma vida de 10^6 ciclos, valor acima de qualquer das misturas em comparação e que configura uma resistência à fadiga muito superior. No quadro 20 estão representados os valores para a extensão ϵ_6 obtidos nos estudos.

Quadro 20- Valores de ϵ_6 obtidos para as misturas no estudo à fadiga

	ϵ_6	Inclinação da lei de fadiga
100MBR (100% MBR+18% OAU+ 6% PEBD+1% betume novo)	228 $\mu\text{m/m}$	-0,127
85MBR (85% MBR+15% agregado novo+18% OAU+ 6% PEBD+1,5%)	353 $\mu\text{m/m}$	-0,127
Fernandes (2018) (100% MBR+18% OAU+1% betume novo)	252 $\mu\text{m/m}$	-0,165
Almeida et al (2019) (AC 14 surf 35/50, com 6% PEBD)	122 $\mu\text{m/m}$	-0,199
Almeida et al (2019) (AC 14 surf 35/50)	131 $\mu\text{m/m}$	-0,223

A inclinação da lei de fadiga, representada pelo expoente do número de ciclos de carga, representa a sensibilidade da resistência à fadiga à variação da extensão aplicada durante os ensaios. Na observação da inclinação das retas que definem as leis de fadiga para as misturas em comparação (figura 58), é visível que as misturas 100MBR e 85MBR possuem inclinações semelhantes e possuem uma inclinação ligeiramente inferior à de Fernandes (2018). O quadro 20 mostra que quer o AC 14 convencional quer o AC 14 com PEAD estudados por Almeida et al. (2019) apresentaram uma resistência à fadiga com maior sensibilidade à variação da extensão que as misturas com MBR e OAU como rejuvenecedor. A introdução de PEBD parece reduzir a resistência à fadiga, tendo-se verificado essa mesma tendência quando se observam os resultados de composições comparáveis: a mistura estudada por Fernandes (2018) sem PEAD mostrou maior resistência que a 100MBR (com PEBD); o AC 14 sem PEBD apresentou maior resistência que o AC 14 com PEBD.

Tal como se referiu anteriormente, a existência de uma maior parcela de betume rejuvenescido na 85MBR que na 100MBR, resultante da adição de mais betume novo na primeira, é suscetível de explicar o melhor desempenho observado para a resistência à fadiga da mistura 85MBR.

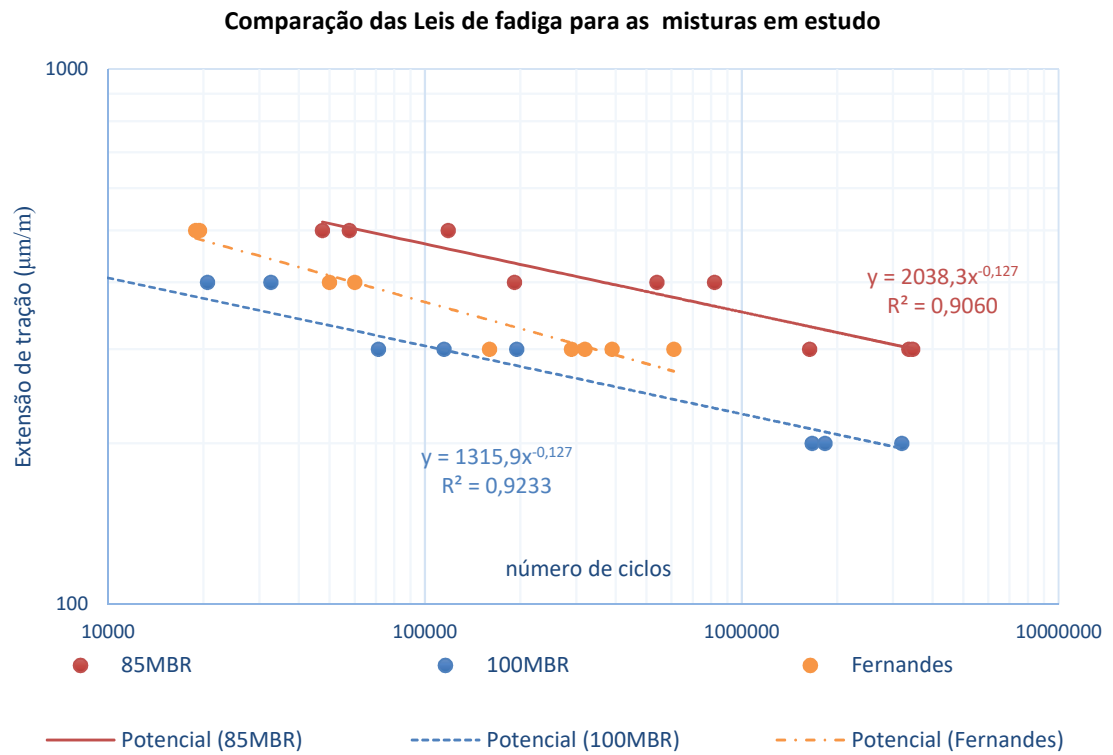


Figura 57- Comparação das Leis de fadiga para as misturas em estudo

5 Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões do trabalho desenvolvido

A presente dissertação teve como principal objetivo estudar a utilização de misturas betuminosas recuperadas (MBR) como uma solução económica e ambientalmente mais sustentável, visando o conceito de economia circular. Para possibilitar um melhor desempenho do material final produzido com incorporação total de MBR, o estudo incluiu a utilização de óleo alimentar usado (OAU) como rejuvenescedor do betume envelhecido, e polietileno de baixa densidade (PEBD) recuperado de resíduos sólidos urbanos. A aplicação na mistura de três resíduos da atividade humana é suscetível de contribuir para a melhoria do desempenho das misturas betuminosas e de conduzir a uma reutilização destes materiais.

A revisão da literatura realizada na fase inicial da dissertação permitiu sintetizar alguns conceitos e ideias importantes no que diz respeito à utilização de MBR, OAU e PEBD, salientando-se os seguintes:

- As MBR possuem grande potencial como material a ser reutilizado e valorizado que não pode ser desperdiçado;
- A utilização de MBR leva a uma diminuição nos custos de produção por não exigir a exploração de matérias-primas novas;
- Os cuidados com o armazenamento das MBR são fundamentais para uma melhor reutilização e um melhor desempenho do material final;
- É fundamental conhecer as características dos materiais que compõe as MBR para sua reutilização;
- A aplicação de OAU como aditivo quando se reutilizam MBR tem um efeito rejuvenescedor sobre o betume envelhecido;
- É importante saber o comportamento do betume envelhecido existente na MBR, a capacidade de este se ligar ao novo betume introduzido e aos agregados, e o efeito de *black-rock* (ligante envelhecido que não é possível reativar) que este pode apresentar;
- É importante o doseamento correto do rejuvenescedor na mistura;
- A utilização de plásticos provenientes dos RSU, nomeadamente o PEBD, possuem um efeito modificador do betume;
- A utilização de MBR em misturas betuminosas conduz, em geral, a uma boa resistência à deformação permanente;
- A incorporação de MBR em misturas betuminosas tende a levar a um comportamento deficiente quando sujeitas a temperaturas muito baixas, podendo levar, em determinada conjugação de qualidade do próprio MBR, a fratura térmica;

- Altas taxas de incorporação de MBR levam a um decréscimo de rendimentos das centrais de produção de misturas;
- É necessário nas centrais de produção um investimento adicional para o pré-aquecimento do MBR, de modo poderem operar com maiores taxas de incorporação desse material.

Da análise dos trabalhos laboratoriais realizados ao longo deste estudo, podem retirar-se as conclusões que se apresentam a seguir.

- No estudo Marshall ambas as misturas estudadas apresentaram valores elevados para a estabilidade (24,8 kN para a mistura 100MBR e 19,1 kN para 85MBR), as deformações e as baridades aparentes apresentaram valores satisfatórios. A porosidade da mistura 100MBR apresentou um valor abaixo do mínimo indicado no Caderno de Encargos Tipo Obra para uma mistura do tipo AC14. O valor do VMA satisfaz o Caderno de Encargos Tipo Obra.
- No estudo da sensibilidade à água, os valores do ITSR foram bons para ambas as misturas (89% para a 100MBR e 107% para 85MBR).
- No estudo do comportamento à deformação permanente, ambas as misturas obtiveram valores satisfatórios. No ensaio de pista (wheel-tracking) as profundidades das rodeiras obtidas foram de 3,93 mm para a mistura 100MBR e de 3,64 mm para a 85MBR. Pela compressão uniaxial, as deformações obtidas foram de 0,13 mm para a mistura 100MBR e de 0,48 mm para a 85MBR. O efeito da introdução de agregado novo 4/16 na mistura 85MBR, para reforçar o esqueleto pétreo e melhorar a resistência à deformação permanente parece ter sido contrariado pela existência de uma maior relação entre as quantidades de betume e de partículas de filler.
- No que se refere ao módulo de rigidez à temperatura de 20°C, ambas as misturas apresentaram valores inferiores aos geralmente obtidos para um AC14 convencional. Os valores medidos para a frequência de 10 Hz são bastante aceitáveis para a 100MBR (4572 MPa) e abaixo do desejável para a mistura 85MBR. Neste último caso, os resultados parecem ter sido influenciados pela adição de mais betume novo e de agregado 4/16 (sem finos), o que pode ter levado a um mástique menos estável que no caso da 100MBR.
- A introdução de PEBD nas misturas conduziu a resultados um pouco contraditórios em termos de valores de ângulo de fase esperados. A mistura 85MBR revelou ângulos de fases superiores à 100MBR, mas os valores obtidos por Fernandes são

mais elevados que os medidos para a mistura 100MBR, não obstante os valores mais baixos dos módulos de rigidez observados para a 100MBR;

- No estudo da resistência à fadiga, a mistura 100MBR apresentou um ε_6 de 228 $\mu\text{m/m}$ e a mistura de 85MBR um ε_6 de 353 $\mu\text{m/m}$, o que representa uma muito boa resistência à fadiga, bastante superior à medida para uma AC14 analisado noutro estudo e usado para comparação.
- A eventual falta de homogeneidade entre os lotes de MBR utilizados podem ter contribuído para alguns resultados mais inesperados, pelo que é muito importante controlar a composição da matéria-prima.

Os resultados obtidos deram boas indicações quanto à capacidade de reutilização integral de MBR rejuvenescidas com OAU, ao mesmo tempo que permitiram verificar o contributo benéfico do PEBD como polímero modificador do betume, por exemplo, em relação à resistência à deformação permanente e à contribuição para um comportamento mais elástico das misturas betuminosas finais.

Em síntese, julga-se que o trabalho desenvolvido poderá contribuir para uma maior divulgação da reciclagem integral de MBR e da sua importância para uma economia circular na indústria de pavimentação.

A avaliação do desempenho das duas misturas com elevada incorporação de MBR, OAU como rejuvenescedor e PEBD como polímero modificador do betume, poderão satisfazer os requisitos para um pavimento rodoviário com tráfego pesado médio ou baixo, tais como zonas residenciais e para redes rodoviárias municipais, onde as questões da economia circular, da redução dos impactes ambientais e do uso eficiente de recursos se colocam ainda com maior expressão.

5.2 Trabalhos futuros

Concluído este trabalho e após a observação dos resultados obtidos, é importante indicar algumas linhas orientadoras para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Seria importante avaliar o comportamento das misturas betuminosas produzidas com MBR quanto à sua durabilidade ao longo do tempo quando submetidas à ação dos elementos naturais, como a exposição solar, as variações de temperaturas sazonais e a ação da precipitação e, claro, a ação do tráfego. Assim, seria interessante desenvolver os seguintes estudos:

- Estudar o envelhecimento das misturas produzidas com MBR, OAU e PEBD através do seu envelhecimento em laboratório quando sujeito à ação dos raios ultravioletas;
- Realizar um estudo, utilizando a prensa giratória de corte, para avaliar melhor com este equipamento o processo de compactação e a problemática relacionada com a trabalhabilidade deste tipo de misturas;

- Estudar a produção em central deste tipo de misturas betuminosas, de modo a analisar o processo de fabricação e aplicação em obra, com o objetivo de adaptar o processo de produção à escala real, procurando obter melhorias no produto final;
- Construção de trechos experimentais em estradas em serviço, para ser possível observar o comportamento da mistura, ao longo do seu tempo de vida útil, quando sujeita a ação real do tráfego, dos elementos atmosféricos e da radiação ultravioleta, sendo possível a recolha de amostras para posteriores estudos laboratoriais de materiais produzidos em condições de produção.

Referências Bibliográficas

Abreu, L.P.F., (2012) “Estudo de misturas betuminosas recicladas com incorporação de resíduos plásticos”. Tese de Mestrado. Guimarães, Universidade do Minho.

Almeida, A., Capitão, S., Bandeira, R., Fonseca, M., Picado-Santos, L.(2019) “Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing”. Artigo submetido à “Construction and Building Materials”.

American Association of State Highway (2000) “Hot-Mix Asphalt Paving Handbook 2000”.

Antunes, V., Freire, A.C., Neves, J., (2019) “A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling”. Construction and Building Materials, Vol. 211, pp 453-469.

Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R. (2012) “Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder”. Construction and Building Materials, Vol.37, pp 398-405

Azahar, W.N.A.W., Jaya, R.P., Hainin, M.R., Bujang, M., Ngadi, N. (2016) “Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder”. Construction and Building Materials, Vol. 126, pp 218-226.

Azevedo, M.; Ribeiro, J.; Teixeira, Adriano (2003). II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários- Reciclagem de Pavimentos. Porto, Fundação Calouste Gulbenkian.

Bonaquist, R.,(2011) “Mix design practices for warm-mix asphalt. Washington, DC: Transportation Research Board

Carvalho, A.L. (2018) “Dosagem de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com Asfalto Fresado”. Trabalho para grau de bacharel. Brasília, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Cavalli, M.C., Zauamanis, M., Mazza, E., Partl, M.N., Poulidakos, L.D.,(2018) “Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-bases rejuvenators”. Composites, Part B, Vol. 141, pp 174-181

Cavalli, M.C., Partl, M.N., Poulidakos, L.D. (2017) “Measuring the binder film residues on black rock in mixtures with high amounts of reclaimed asphalt”. Cleaner Production, Vol. 149, pp 665-672.

Comissão Europeia (2018); Uma Estratégia Europeia para os Plásticos na Economia Circular.

Costa, L.M.B., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Fernandes, S.R.M. (2013) “Incorporation of Waste Plastic in Asphalt Binders to Improve their Performance in the Pavement”. International Journal of Pavements Research and Technology, Vol.6, pp 457-464.

Costa, L.M.B., Silva, H.M.R.D., Peralta, J., Oliveira, J.R.M. (2019) “Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification – Performance and morphological assessment”. Construction and Building Materials, Vol.198, pp 237-244.

Dias, J.L.F. (2011) “Misturas Betuminosas Incorporando por Via Seca Borracha de Pneus Usados”. Tese de Doutoramento Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra.

Estradas de Portugal, SA (2009), “Caderno de Encargos Tipo Obra, 14.03 - Pavimentação, Características dos materiais.

Federal Aviation Administration (2000) “The Hot-Mix Asphalt Paving Handbook 2000”, part II.

Fernandes, F.; Picado-Santos, L., Capitão, S. (2018) “Reciclagem total de misturas betuminosas usando óleo alimentar como rejuvenecedor”. 9º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 28-30, maio 2019.

Fernandes, F.M.D.P. (2018) “Reciclagem total de misturas betuminosas usando óleo alimentar usado como rejuvenecedor”. Tese de Mestrado. Lisboa, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Fonseca, M.P. (2018) “Estudo de Misturas Betuminosas”. Relatório de estágio formal para admissão à Ordem dos Engenheiros.

Fonseca, M.P., Almeida, A., Capitão, S., Bandeira, R., Rodrigues, C. (2018), “Avaliação do uso de plásticos recuperados de resíduos sólidos urbanos como agente modificador de misturas betuminosas”. 9º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 28-30, maio 2019

Fonseca, P. Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Abreu, L. (2013) “Estudo de material fresado para incorporação em misturas betuminosas a Quente com altas taxas de reciclagem”. 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa 10-12, abril 2013.

Hunter, Robert (2003). *Asphalts in road construction*. London, Thomas Telford Publishing.

Illinois Center for Transportation, (2009) “Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP”.

Jaya, P.R., Masri, K.A., Awang, H., Ali, M.I., Ramli, N. I., Azahar, W.N.A.W., Shaffie, E., Yaacob, H., Warid, M.N.M., Ramli, I. (2019) “Stability and Stiffness of Asphaltic Concrete Incorporating Waste Cooking Oil”. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, Vol. 7.

Kalantar, Z.N., Karin M.R., Mahrez A. (2012) “A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp 55-62.

Kishchynskyi, S., Nagaychuk, V., Bezuglyi, A. (2016) “Improving Quality and Durability of Bitumen and Asphalt Concrete by Modification Using Recycled Polyethylene Based Polymer Composition”. *Procedia Engineering*, Vol.143, pp 119-127.

Köfteci, V., Ahmedzade, P., Kultayev, B. (2014) “Performance evaluation of bitumen by various types of waste plastics”. *Construction and Building Materials*, Vol. 73, pp 592-602.

Liu, S., Shukla, A., Nandra, T. (2017) “Technological, environmental and economic aspects of Asphalt recycling for road construction”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, pp 879-893.

Lizárraga, J.M.; Ramírez, A.; Díaz, P.; Marcobal, J. R.; Gallego, J. (2018) “Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation. *Construction and Building Materials*. 10 May 2018 170:433-445 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.051,

Lo Presti, D.L., Cárion, A.J.B., Airey, G., Hajj, E. (2016) “Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road courses binder design methodology and case studies”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 131, pp 43-51.

Martinho, F., Picado-Santos, L., Capitão, S. (2017) “Mechanical properties of warm-mix asphalt concrete containing different additives and recycled asphalt as constituents applied in real production conditions”. *Construction and Building Materials*, Vol.131, pp 78–89.

- Martinho, F.C.G. (2014) “Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais- Caracterização e Validação Tecnológica”. Tese de Doutoramento. Lisboa, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico
- Mazzoni, G., Bocci, E., Canestrari, F. (2018) “Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures”. *Science Direct*, Vol.5, pp 157-168
- Moghaddam, T.B., Baaj, H. (2016) “The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mis asphalt: A systematic review”. *Construction and Building Materials*, Vol.114, pp 805-816.
- Naskar, M., Chaki, T.K., Reddy, K.S. (2010) “Effect of waste plastic as modifier on thermal stability and degradation kinetics of bitumen/waste plastics blend”. *Thermochimica Acta*, Vol.509, pp 128-134.
- Neves, J.; Freire, A.; Batista, F. (2017). *Materiais tratados e reciclados em infraestruturas de transportes*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa
- Picado-Santos, L., Baptista, A., Capitão, S. (2010) “Assessment of the Use of Hot Mix Recycled Asphalt Concrete in Plant, ASCE” - *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 136 – No 12, pp. 1159-1164.
- Picado-Santos, L.; Pereira, P. (2002). *Pavimentos Rodoviários*. Braga, Tipografia Barbosa & Xavier.
- Lin, P.-Sien, Wu, T.-Lin, Chang, C.-Wen, Chou, B.-Yan. (2011) “Effects of recycling agentes on aged asphalt binders and reclaimed asphalt concrete”. *Materials and Structures*, Vol 44, pp 911-921
- Publindústria Lda, (2017), *Revista Industrial e Ambiente* 103.
- Ragaert, K., Delva, L., Geem, K.V. (2017) “Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste”. *Waste Management*, Vol. 69, pp 24-58
- Romera, R., Santamaría, A., Peña, J., Muñoz, M.E., Barral, M., García, E., Jañez, V. (2006) “Rheological aspects of the rejuvenation of aged bitumen”. *Rheol Acta*, Vol. 45, pp 474-478
- Saroufim, E., Celauro, C., Mistretta, M.C. (2018) “A simple interpretation of the effect of the polymer type on the properties of PMBs for road paving applications.” *Construction and Building Materials*, Vol. 158, pp 114-123
- Shao, H., Sun, L., Liu, L., You, Z., Yang, X. (2017) “A novel double-drum mixing technique for plant hot mix asphalt recycling with high reclaimed asphalt pavement content and rejuvenator”, Vol. 134, pp 236-244.
- Silva, A. (2014) “Formulação de misturas betuminosas a quente: análise comparativa da aplicação de métodos empíricos volumétricos”. Tese de Mestrado. Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I.P.S., Feo, L. (2017). “Recycling of Plastic solid waste: A state of art review and future applications”. *Composites*, Vol. 115, pp 409-422.
- Stimilli, A., Virgili, A., Canestrari, F. (2015) “New method to estimate the re-activated binder amount in recycled hot-mix asphalt”. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 16, pp 442-459. *Construction and Building Materials*, Vol. 158, pp 114-123.
- Thom, N. (2008). *Principles of pavement engineering*. London, Thomas Telford Publishing.
- Tran, N., Taylor, A., Turner, P., Holmes, C., Porot, L. (2016) “Effect of rejuvenator on performance characteristics of high RAP mixture”. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 18, pp 183-208.

- Tran, N., Taylor, A., Willis, R. (2012) "Effect of Rejuvenator on Performance Properties of HMA Mistures with high RAP and RAS Contents". National center for Asphalt Technology. Alabama.
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (2011) "Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of Practice. Georgetown Pike.
- Valentin, J.; Čížková, Z.; Suda, J.; Batista, F.; Mollenhauer, K.; Simnofske, D. (2016). "Stiffness Characterization of Cold Recycled Mixtures, In Transport Research Arena" TRA2016, Transportation Research Procedia. 2016 14:758-767. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.065.
- West, R. Willis, J.R., Marasteanu, M., (2013) "Improved mix design, evaluation and, materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt content". National Center for Asphalt Technology. Auburn, Alabama.
- Yu, B., Gu, X., Wu, M., Ni, F. (2017) "Application of high percentage of reclaimed asphalt pavement in an asphalt mixture: blending process and performance investigation". Road Materials and Pavement Design, Vol. 18, N° 3; pp 753-765.
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., Karim, M.R. (2012) "Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen". Journal of Hazardous Materials, Vol. 233-243, pp 254-258.
- Zaumanis, M., Cavalli, M.C., Poulikakos, L.D. (2018) "Effect of rejuvenator addition location in plant on mechanical and chemical properties of RAP binder". International Journal of Pavement Engineering.
- Zaumanis, M., Mallick, Poulikakos, L.D., Frank, R. (2014) "Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures", Vol. 71, pp 538-550.
- Zaumanis, M., Mallick, R.B., (2015) "Review of high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of art". International Journal of Pavement Engineering, Vol. 16, pp 39-55.
- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R. (2014) "100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis". Resources, Conservation and Recycling, Vol. 92, pp 230-245
- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R. (2016) "100% hot mix asphalt recycling: challenges and benefits". Science Direct, Vol. 14, pp 3493-3502.
- Zaumanis, M., Poulikakos, L.D., Partl, M.N. (2018) "Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters". Materials Design, Vol. 141, pp 185-201.
- Zhang, K., Huchet, F., Hobbs, A. (2019) "A review of thermal process in the production and their influences on performance of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP)". Construction and Building Materials, Vol. 206, pp 609-619.

Webgrafia

- http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/about/roadmap/index_en.htm (European Commission, consultado em maio de 2019)
- <http://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/biomass-resources/challenges-related-to-biomass/used-cooking-oil-recycling/> (European Biomass Industry Association, consultado em maio de 2019)
- <http://www.explicatorium.com/quimica/polimeros.html> (Explicatorium, consultado em abril 2019)
- <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/> (Infraestruturas de Portugal, consultado em fevereiro de 2019)
- <https://eapa.org/> (European Asphalt Pavement Association, consultado em maio de 2019)
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic#Structure> (Wikipedia, consultado em abril 2019)
- <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/pt/TXT/?uri=CELEX:52018DC0028> (EUR Lex: Access to European Union law, consultado em maio 2019)
- <https://pontosdevista.pt/2019/01/08/os-plasticos-ambiente-lado-da-historia/?fbclid=IwAR0J7c59X03bkRkOvRxw8VKTpSaNxph5W9-lcd3yJmjIyl5sYRK40MS72dA> (Pontos de Vista, Nuno Aguiar, consultado em março de 2019)
- <https://sites.google.com/site/martinszaumanis/100-rap/production-technologies> (Martins Zaumanis, 100% Recycled Hot-Mix Asphalt Production, consultado em março de 2019)
- <https://www.apambiente.pt/> (Agência Portuguesa do Ambiente, consultado em junho de 2019)
- <https://www.eunomia.co.uk/> (Eunomia, consultado em junho de 2019)
- https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/1025447 (Federal Aviation Administration, consultado em junho de 2019)
- <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/index.cfm> (Federal Highway Administration, consultado em junho de 2019)
- <https://www.pavementinteractive.org/> (Pavement Interactive, consultado em abril de 2019)
- <https://www.pordata.pt/> (Pordata- Base de Dados Portugal Contemporâneo, consultado em abril de 2019)
- <https://www.quercus.pt/> (Associação Nacional de Conservação da Natureza, consultado em abril de 2019)
- <https://www.quercus.pt/fileiras-residuos/3617-oleos-alimentares-usados> (Associação Nacional de Conservação da Natureza, consultado em abril de 2019)
- https://www.rtp.pt/noticias/pais/oleos-alimentares-usados-da-confecao-ao-pesadelo-da-contaminacao_es1053642 (Rádio Televisão Portuguesa, consultado em abril de 2019)
- <https://zero.org/portugal-fabrica-biodiesel-com-10-vezes-mais-oleos-alimentares-usados-importados-que-nacionais/> (ZERO - Associação Sistema Terrestre Sustentável)

Documentos Normativos

E 472-2009. “Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em centrais”, Especificação LNEC

EN 12697-6. “Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens”. European Committee for Standardization

EN 12697-8. “Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens”. European Committee for Standardization

EN 12697-33. “Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor”. European Committee for Standardization

EN 12697-22. “Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracking”. European Committee for Standardization

EN 12697-23. “Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens”. European Committee for Standardization

EN 12697-25. “Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 25: Cyclic compression test”. European Committee for Standardization.

EN 12697-34. “Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 34: Marshall test”. European Committee for Standardization

EN 12697-30. “Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 30: Specimen preparation by impact compactor”. European Committee for Standardization

EN 12697-35. “Bituminous mixtures. Test methods. Part 35: Laboratory mixing”. European Committee for Standardization

EN 12697-24. “Bituminous mixtures. Test methods. Part 24: Resistance to fatigue”. European Committee for Standardization

EN 12697-26. “Bituminous mixtures. Test methods. Part 26: Stiffness”. European Committee for Standardization

EN 12697-12. “Bituminous mixtures. Test methods. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens”. European Committee for Standardization

“Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central”, E 472-2009, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

EN 13108-8. “Bituminous mixtures. Material specifications. Part 8: Reclaimed asphalt”

IPQ (2011a), “Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentação”, NP EN 12591, Instituto Português da Qualidade

IPQ (2011b), “Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso” NP EN 13108-1, Instituto Português da Qualidade

IPQ (2014a), “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método da peneiração”, NP EN 933-9, Instituto Português da Qualidade

Anexos

Anexo A- Propriedades e requisitos mínimos para a MBR e taxas de incorporação

Quadro I - Propriedades e requisitos mínimos de conformidade das misturas betuminosas recuperadas

Requisitos de conformidade (EN 13108-8)		Misturas betuminosas recuperadas		
Propriedade ⁽¹⁾	Norma de ensaio	MBR1	MBR2	MBR3
Presença de matéria estranha na mistura betuminosa recuperada	EN 12697-42	F1	F5	F5
Ligante presente na mistura betuminosa recuperada	Tipo de ligante ⁽¹⁾	Betume (tradicional) ou Betume Modificado		Betume (tradicional), Betume Modificado ou Betume Duro
	Características do ligante recuperado	EN 12697-3 ou EN 12697-4 ou EN 1426 ou EN 1427	P15 ou S70 ⁽²⁾ ou $P \geq 15 \times 10^{-1} \text{ mm}$ ou $S \leq 70 \text{ }^{\circ}\text{C}^{(3)}$	P15 ou S70 ⁽²⁾ ou $P \geq 15 \times 10^{-1} \text{ mm}$ ou $S \leq 70 \text{ }^{\circ}\text{C}^{(3)}$
Dimensão máxima das partículas da mistura betuminosa recuperada	EN 933-1+A1:2005	32 mm	32 mm	32 mm
Agregado da mistura betuminosa recuperada	Granulometria média	EN 933-1+A1:2005	Valores a declarar	Valores a declarar
	Dimensão máxima, D	EN 933-1+A1:2005	Valor a declarar	Valor a declarar
Percentagem média de ligante na mistura betuminosa recuperada	EN 12697-1	Valor a declarar	Valor a declarar	Valor a declarar
Teor de água máximo da mistura betuminosa recuperada	EN 12697-14	5 %	5 %	5 %

P Penetração a 25 °C do ligante presente na mistura betuminosa recuperada.

S Temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola do ligante presente na mistura betuminosa recuperada.

(1) Ver EN 12597.

(2) Requisito a aplicar no caso de o tipo de ligante presente na mistura betuminosa recuperada ser um betume de pavimentação (tradicional).

(3) Requisito a aplicar no caso de o tipo de ligante presente na mistura betuminosa recuperada ser um betume modificado de pavimentação.

(4) Requisito a aplicar no caso de o tipo de ligante presente na mistura betuminosa recuperada ser um betume de pavimentação (tradicional) ou um betume duro de pavimentação.

Quadro II - Campo de aplicação e taxas máximas de incorporação de misturas betuminosas recuperadas no fabrico de misturas recicladas a quente

Classificação das misturas betuminosas recuperadas (EN 13108-8)	Campo de aplicação	Taxa máxima de incorporação ⁽¹⁾
MBR1	Camadas de desgaste	10 % ⁽²⁾
	Camadas de regularização, de ligação e de base	50 % ⁽²⁾
MBR2	Camadas de regularização, de ligação e de base	25 % ⁽²⁾
MBR3	Camadas de regularização, de ligação e de base	10 % ⁽²⁾

(1) Admitem-se taxas de incorporação superiores, recorrendo eventualmente a produtos rejuvenescedores, desde que o estudo de formulação seja complementado com ensaios para avaliação das características do ligante recuperado na mistura final e do desempenho desta mistura, nomeadamente no que se refere à resistência à fadiga, às deformações permanentes e ao envelhecimento.

(2) Para além de obedecer a este critério, a taxa de incorporação de misturas betuminosas recuperadas é condicionada pelo processo de fabrico (ver secção 4.2), pelos resultados do estudo de formulação da mistura e pelas características do ligante recuperado da mistura final.

fonte: LNEC, E 472-2009

Anexo B- Percentagem de betume existente na MBR



Código da obra:	Tipo de Mistura
Nome da obra:	AC 14 surf 35/50 (BB)
Dono de Obra:	Amostra n.º

Percentagem de Betume

Código do ensaio:	Gr: Passad Vm; S; B	Norma:	NP EN 933; EN 12697-6; EN 12697-8; EN 12697-34; EN 12697-39
-------------------	---------------------	--------	---

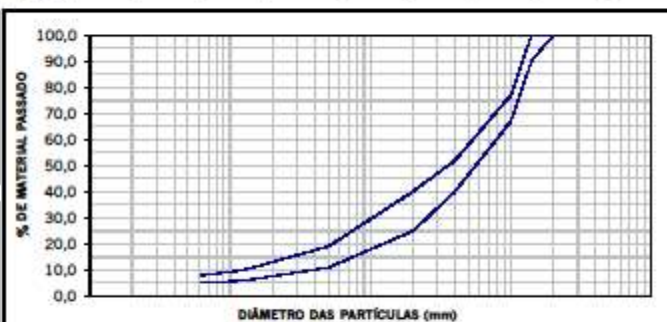
Dia da colheita	18-06-2018	Temperatura	
Localização	A23	Hora	

	Peneiros mm	Material Retido		Mat. Acumulado		Fuso	
		S.C. J.J.R. (g)	Perc. (%)	Passado (%)	Retido (%)	Limite inferior	Limite superior
	20	0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	14	0	100,0		100,0	90,0	100,0
	10	0	0,0		100,0	67,0	77,0
	4	0	0,0		100,0	40,0	52,0
Provetes (Compactador de impacto com pedestral de madeira)							
Nº pancadas	75	2	0	0,0	100,0	25,0	40,0
Temperatura compactação	165 °C	0,5	0	0,0	100,0	11,0	19,0
		0,125	0	0,0	100,0	6,0	10,0
		0,063	0	0,0	100,0	5,0	8,0
Bandada máxima teórica (Procedimento A - Volumétrico)		< 0,063	0	0,0	100,0		
#REF!	Total		100,0	100,0	100,0		

Nº prov.	h média (mm)	ρ _w (Kg/m³)	Peso (g)			Baridade ρ _{pass} (Kg/m³)	Caract. Volumétricas			Estabilidade (S)		Deform. F _r (mm)	Deform. F _t (mm)	Quociente Marshall (kN/mm)
			no ar (m _a)	na água (m _p)	sup. seca (m _s)		V _m (%)	VMA (%)	VFB (%)	Medida (N)	Corrig. (kN)			
1	63													
2	63													
3	63													
4	63													
Procedimento	B	Temp.			Médias									

Pesos (g)		
Tara	W _t	3 910,4 g
Tara+Amostra	W _{t+a}	5 528,7 g
Tara+Agregado	W _{t+a}	1 618,3 g
Amostra	W _a	1 618,3 g
Agregado	W _a	1 541,2 g
Betume	W _{bet}	77,1 g

Betume	
Método/Valor de calibração	
% betume	4,76%
Baridade betume	1020
Rel. ponderal filler/betume	0,00



Ensaio:	Verificou:	Em conformidade: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
Operador Laboratório		Obs: % betume amostra

5070803

Incineração do fresado utilizado no estudo



Código da obra:	Tipo de Mistura
Nome da obra:	AC 14 surf 35/50 (BB)
Dono de Obra:	Amostra n.º

Percentagem de Betume

Código do ensaio:	Gr; Passad; Vm; S; B	Norma:	NP EN 933; EN 12697-6; EN 12697-8; EN 12697-34; EN 12697-39
-------------------	----------------------	--------	--

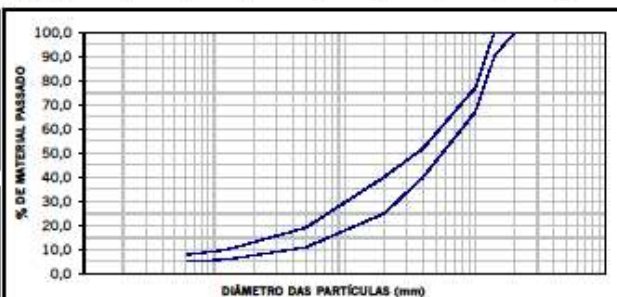
Dia da colheita	18-06-2018	Temperatura	
Localização	A23	Hora	

Peneiros	mm	Material Retido		Mat. Acumulado		Fuso	
		§ C. J.J.R.	Perc.	Passado	Retido	Limite inferior	Limite superior
		(g)	(%)	(%)	(%)		
	20	0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	14	0	100,0		100,0	90,0	100,0
	10	0	0,0		100,0	67,0	77,0
	4	0	0,0		100,0	40,0	52,0
	2	0	0,0		100,0	25,0	40,0
	0,5	0	0,0		100,0	11,0	19,0
	0,125	0	0,0		100,0	6,0	10,0
	0,063	0	0,0		100,0	5,0	8,0
	< 0,063	0	0,0		100,0		
Total			100,0	100,0	100,0		

Nº prov.	h média (mm)	p _w (Kg/m³)	Peso (g)			Baridade P _{bet} (Kg/m³)	Caract. Volumétricas			Estabilidade (S)		Deform. F _r (mm)	Deform. F _t (mm)	Quociente Marshall (kN/mm)
			no ar (m _a)	na água (m _x)	sup. seca (m _s)		V _m (%)	VMA (%)	VFB (%)	Medida (N)	Corrig. (kN)			
1	63													
2	63													
3	63													
4	63													
Procedimento	B	Temp.	21,0 °C	Médias										

Pesos (g)		
Tara	W _t	3 910,4 g
Tara+Amostra	W _{t+a}	5 415,0 g
Tara+Agregado	W _{t+a}	5 411,8 g
Amostra	W _a	1 504,6 g
Agregado	W _a	1 501,4 g
Betume	W _{bet}	3,2 g

Betume	
Método/Valor de calibração	
% betume	0,21%
Baridade betume	1020
Rel. ponderal filler/betume	0,00



Ensaiou:	Verificou:	Em conformidade: Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
Operador Laboratório		Obs: Calibração

SOT0803

Determinação da perda de agregado durante o processo de incineração (Aprox. 0,213%)

Percentagem de betume na MBR= $4,76 - 0,213 = 4,55\%$

Anexo C- Relatório Marshall para as misturas 100MBR e 85 MBR

Quadro III – Resultados dos provetes da mistura 100MBR

Ensaio à Compressão Marshall Norma de Ensaio EN 12697-34:2004+A1 de Julho 2007

Identificação do provete:			1.1	1.2	1.3	1.4	Média
	Baridade	g/cm ³	2377,1	2338,6	2348,7	2331,7	2349,03
S	Estabilidade medida	kN	22,5	23,5	26,4	23,4	24,0
h	Altura do provete	mm	61,9	62,5	64,1	60,7	-
$c=1,2a \cdot e^{0,0220a}$	Factor de correcção	-	1,05	1,03	0,99	1,08	-
$S_c = S \times c$	Estabilidade corrigida	kN	23,6	24,2	26,1	25,3	24,8
F	Deformação	mm	2,8	3,2	4,1	3,8	3,5
F_t	Deformação tangencial	mm	1,8	1,7	2,5	2,2	2,1
S_c / F	Módulo de rigidez	kN/mm	8	7,3	6,4	6,2	7,0

Quadro IV – Resultados dos provetes da mistura 85MBR

Ensaio à Compressão Marshall Norma de Ensaio EN 12697-34:2004+A1 de Julho 2007

Identificação do provete:			1.5a	1.6a	1.7a	1.8a	1.9a	Média
	Baridade	g/cm ³	2313,7	2300,5	2300,6	2262,8	2290,5	2293,62
S	Estabilidade medida	kN	21	20,5	20,3	18,5	18,4	19,7
h	Altura do provete	mm	63	63,8	65,9	65,9	66,1	-
$c=1,2a \cdot e^{0,0220a}$	Factor de correcção	-	1,02	1	0,94	0,94	0,94	-
$S_c = S \times c$	Estabilidade corrigida	kN	21,4	20,5	19,1	17,4	17,3	19,1
F	Deformação	mm	2,8	3,5	3,9	3,4	3,1	3,3
F_t	Deformação tangencial	mm	1,4	1,7	2,4	1,8	0,8	1,6
S_c / F	Módulo de rigidez	kN/mm	7,5	5,9	5,2	5,4	5,9	6,0

Anexo D- Resultados apresentados pelos grupos da mistura 100MBR para o estudo à sensibilidade a água



DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE À ÁGUA

EN 12697-12

Identificação da Mistura: Renato 100MBR

Data:

Abril 2019

Grupos			Provetes "a seco"			Provetes "imersos"		
Características dos provetes			1,7	1,6	1,9	1,5	1,8	1,10
Massa do provete (arredondado a 0,1g)			1186,9	1187,3	1166,6	1186,8	1188,2	1160,8
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)			101,9	101,9	101,9	101,7	102,0	102,0
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)			63,6	63,8	63,7	63,6	63,7	63,4
Altura média (mm)			63,7			63,6		
Diferença entre a altura média dos dois grupos (arredondada a 0,1 mm)			0,1					
não deve exceder os 5mm								
Volume geométrico do provete (cm3)			518,7	520,3	519,5	516,6	520,5	518,0
Baridade imersa (g/cm3)			2,3267	2,3336	2,294,5	2,3427	2,3325	2,3036
Baridade imersa média (g/cm3)			2,330			2,326		
A diferença da baridade imersa média dos dois grupos de provetes (g/cm3)			0,004					
não deve exceder os 0,015g/cm3 (15 kg/m3)								
Características dos provetes depois do vácuo								
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)						101,7	101,8	101,8
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)						64	63,8	63,1
Volume do provete (cm3)						519,9	519,3	513,6
provetes após vácuo (cm3)						517,6	(g/cm3)	
após o vácuo não deve exceder 2%			não se determinam			1,0	%	
Ensaio de tracção indirecta EN 12697-23								
Resistência máxima (kN)			14,5	13,5	12,2	13,1	12,2	10,4
Resistência média(KN)			13,4			11,9		
Tracção indirecta ITS (Kpa)			1424,350	1321,962	1196,538	1289,358	1195,365	1023,821
Tracção indirecta média ITS (kPa)			1314,283			1169,514		
Resistência conservada em tracção indirecta ITSr (%)			88,98					

Anexo E- Resultados apresentados pelos grupos da mistura 85MBR para o estudo à sensibilidade a água



DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE À ÁGUA

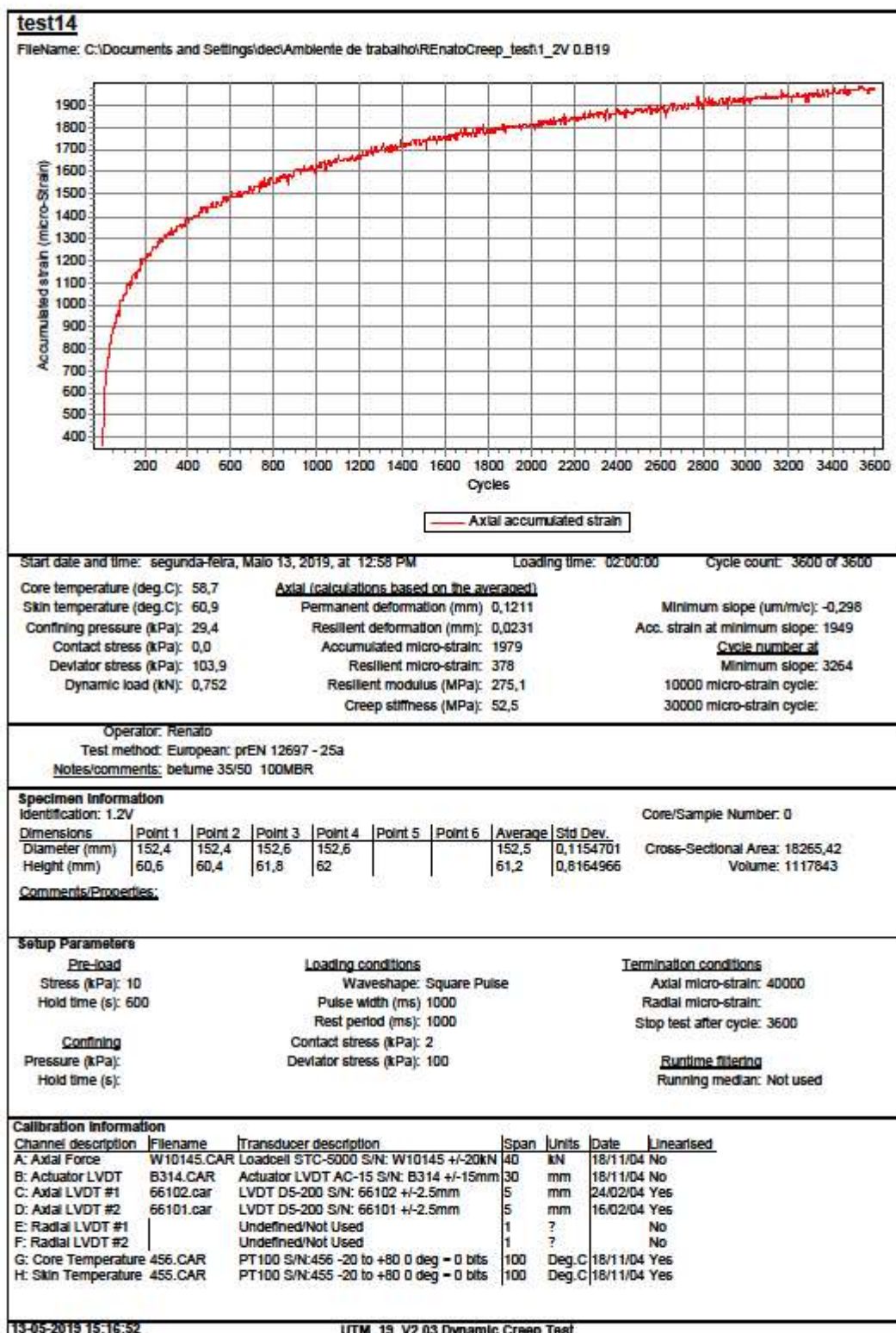
EN 12697-12

Identificação da Mistura: Renato 85MBR

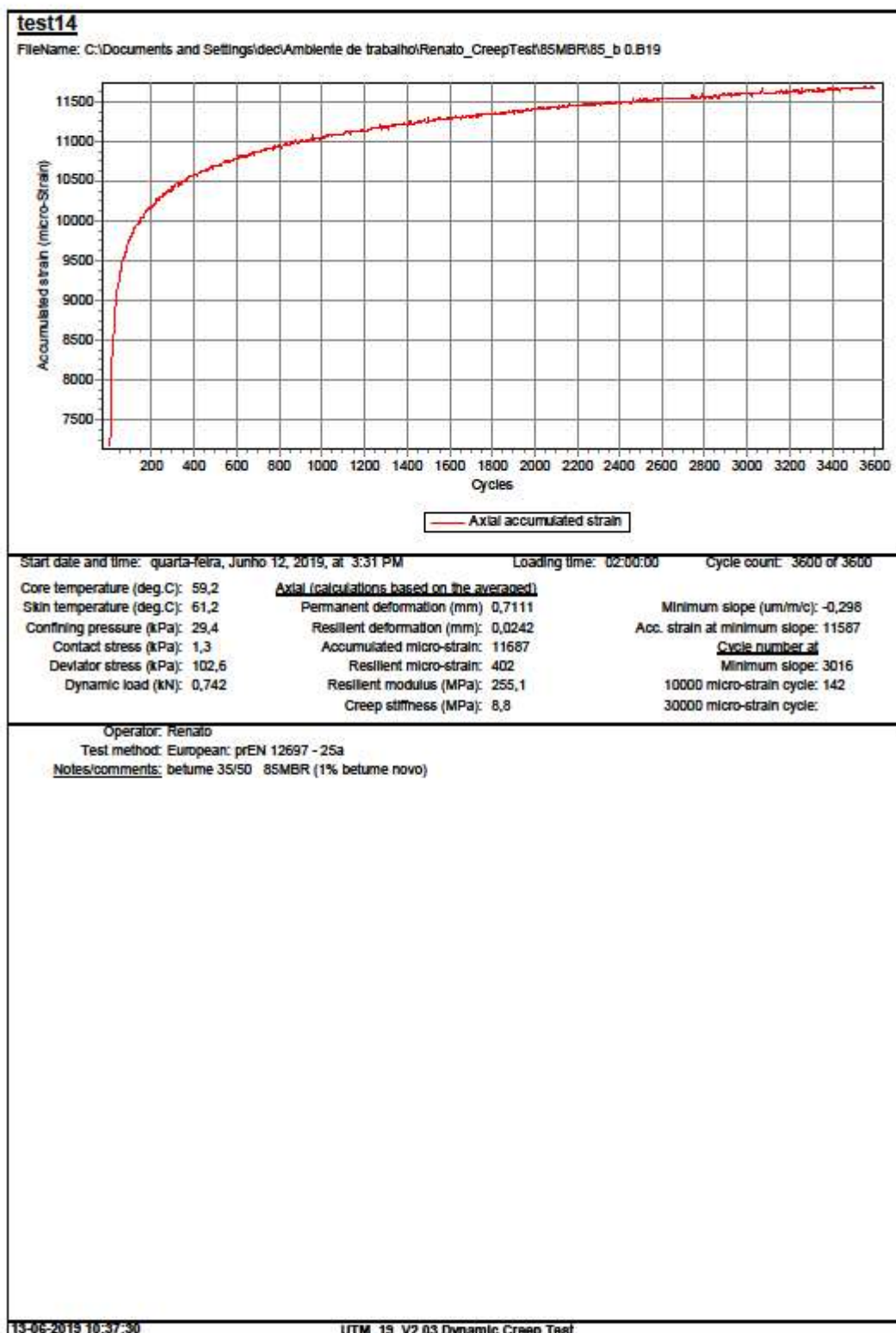
Data: Abril 2019

Grupos	Provetes "a seco"			Provetes "imersos"		
Características dos provetes	1,10a	1,11a	1,13a	1,12a	1,14a	1,15a
Massa do provete (arredondado a 0,1g)	1175,2	1171,2	1173,8	1186,1	1170,8	1182,9
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	102,0	101,9	101,8	101,7	101,8	101,8
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	65,6	65,2	64,8	65,8	65,4	65,7
Altura média (mm)	65,2			65,6		
Diferença entre a altura média dos dois grupos (arredondada a 0,1 mm)	0,4					
não deve exceder os 5mm						
Volume geométrico do provete (cm3)	536,0	531,7	527,4	534,5	532,3	534,7
Baridade imersa (g/cm3)	2,2820	2,2903	2,294,5	2,2771	2,3325	2,2809
Baridade imersa média (g/cm3)	2,286			2,297		
A diferença da baridade imersa média dos dois grupos de provetes (g/cm3)	0,011					
não deve exceder os 0,015g/cm3 (15 kg/m3)						
Características dos provetes depois do vácuo						
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)				101,6	101,8	101,8
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)				65,5	65,3	65,7
Volume do provete (cm3)				531,0	531,5	534,7
Volume dos provetes após vácuo (cm3)				532,4	(g/cm3)	
após o vácuo não deve exceder 2%	não se determinam			1,0	%	
Ensaio de tracção indirecta EN 12697-23						
Resistência máxima (kN)	5,6	6,9	6,3	6,5	7,2	6,6
Resistência média(kN)	6,3			6,8		
Tracção indirecta ITS (Gpa)	532,8	661,161	607,992	618,367	688,473	628,219
Tracção indirecta média ITS (kPa)	600,7			645,0		
Resistência conservada em tracção indirecta ITSr (%)	107,4					

Anexo F- Relatório gerado pelo software da compressão uniaxial para o provete 1.2V (mistura 100MBR)



Anexo G- Relatório gerado pelo software da compressão uniaxial para o provete 85b (mistura 85MBR)



Anexo H- Dimensões e baridades das vigas produzidas para o estudo

Dimensões das vigas e suas baridades

100 MBR											
Laje 100.3	Vigas	largura (mm)				altura (mm)				Baridades (kg/m ³)	
										Geométrica	aparente
	b1	51,83	51,07	51,01	50,59	50,42	52,15	50,79	50,98	2272,0	2359,7
	b2	50,05	50,44	50,78	51,26	51,51	50,97	52,38	50,18	2317,1	2359,9
	b3	49,97	50,41	50,69	51,12	51,55	51,07	52,50	50,93	2314,0	2367,6
	b4	50,48	50,96	51,48	51,88	51,38	51,09	52,52	51,11	2309,6	2364,8
	b5	51,67	51,47	51,23	50,69	51,10	51,79	50,88	51,55	2273,9	2363,8
Laje 100.4	Vigas	largura (mm)				altura (mm)				Baridades (kg/m ³)	
										Geométrica	aparente
	b6	50,86	51,17	51,52	51,94	51,7	51,52	52,18	50,45	2261,8	2362,0
	b7	50,71	50,94	51,4	51,84	52,16	51,58	52,36	51,1	2287,0	2363,5
	b8	50,67	51,25	51,59	52,05	52,25	51,62	52,7	51,23	2292,3	2362,9
	b9	50,18	51,02	51,36	51,91	52,22	51,68	52,49	51,31	2279,0	2360,4
	b10	49,78	50,74	51,77	53,01	51,36	51,77	51,77	51,16	2236,3	2344,4
85 MBR											
Laje 85.5	Vigas	largura (mm)				altura (mm)				Baridades (kg/m ³)	
										Geométrica	aparente
	v1	51,12	51,98	50,32	49,85	50,58	50,77	50,76	50,42	2294,5	2368,4
	v2	50,00	50,54	51,08	51,52	51,00	51,37	50,85	51,20	2337,8	2373,1
	v3	51,83	51,04	50,65	50,04	51,49	51,00	51,23	50,56	2335,9	2376,0
	v4	51,80	51,79	50,80	50,07	51,44	51,05	51,20	50,35	2330,6	2380,4
	v5	51,78	51,68	51,02	50,06	50,96	50,50	50,62	50,03	2303,8	2388,3
Laje 85.6	Vigas	largura (mm)				altura (mm)				Baridades (kg/m ³)	
										Geométrica	aparente
	v6	50,6	50,91	50,92	51,04	51,42	50,75	51,1	50,44	2300,0	2376,1
	v7	51,90	61,63	50,65	50,1	50,32	51,07	50,73	51,86	2329,1	2382,7
	v8	51,81	51,49	51,21	50,81	50,52	51,18	50,67	52,09	2326,6	2365,1
	v9	50,55	50,63	50,98	51,38	52,18	50,76	51,11	50,77	2330,5	2365,1
	v10	51,82	51,77	51,93	50,75	50,63	50,84	50,72	51,22	2285,1	2355,6

NOTA: O comprimento das vigas é de 400 mm

Anexo I- Resultados do módulo de rigidez e ângulo de fase para a mistura 100MBR

100MBR															
Ângulo de fase															
estágio	frequência(Hz)	Viga	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	Média	Desv.Pad	CV(%)
1	1	Valor	15,40	15,20	14,90	15,30	14,50	15,40	15,30	15,60	14,60	15,00	15,1	0,3	2,3
		Δvalor	0,28	0,08	0,22	0,18	0,62	0,28	0,18	0,48	0,52	0,12			
2	3	Valor	13,10	14,10	13,70	13,60	13,70	14,10	14,00	14,00	13,30	13,70	13,7	0,3	2,3
		Δvalor	0,63	0,37	0,03	0,13	0,03	0,37	0,27	0,27	0,43	0,03			
3	5	Valor	12,30	13,30	13,00	13,30	13,00	13,60	13,40	13,70	12,80	13,20	13,2	0,4	2,9
		Δvalor	0,86	0,14	0,16	0,14	0,16	0,44	0,24	0,54	0,36	0,04			
4	10	Valor	10,10	11,60	10,50	11,00	11,70	11,20	11,00	11,10	10,50	11,00	11,0	0,5	4,3
		Δvalor	0,87	0,63	0,47	0,03	0,73	0,23	0,03	0,13	0,47	0,03			
5	20	Valor	5,90	8,80	7,70	9,70	7,50	8,00	8,90	8,50	6,70	8,60	8,0	1,1	13,3
		Δvalor	2,13	0,77	0,33	1,67	0,53	0,03	0,87	0,47	1,33	0,57			
6	30	Valor	4,30	5,50	4,40	3,80	5,40	5,10	4,00	4,60	3,60	2,80	4,4	0,8	18,5
		Δvalor	0,05	1,15	0,05	0,55	1,05	0,75	0,35	0,25	0,75	1,55			
Módulo de rigidez															
estágio	frequência(Hz)	Viga	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	Média	Desv.Pad	CV
1	1	Valor	3495,50	3519,50	3573,20	3555,10	3479,10	2842,80	3131,70	3171,70	3156,00	2886,00	3281,1	264,7	8,1
		Δvalor	214,44	238,44	292,14	274,04	198,04	438,26	149,36	109,36	125,06	395,06			
2	3	Valor	4034,20	4082,10	4174,80	4135,70	4082,20	3536,80	3639,80	3606,40	3636,60	3352,20	3828,1	286,2	7,5
		Δvalor	206,12	254,02	346,72	307,62	254,12	291,28	188,28	221,68	191,48	475,88			
3	5	Valor	4318,80	4433,00	4542,40	4503,10	4426,90	3703,90	3947,80	3868,90	3933,30	3629,90	4130,8	331,1	8,0
		Δvalor	188,00	302,20	411,60	372,30	296,10	426,90	183,00	261,90	197,50	500,90			
4	10	Valor	4739,70	4897,30	5030,10	5024,10	4884,50	4119,40	4412,60	4289,50	4350,00	3972,40	4572,0	369,4	8,1
		Δvalor	167,74	325,34	458,14	452,14	312,54	452,56	159,36	282,46	221,96	599,56			
5	20	Valor	5257,10	5416,90	5465,80	5202,80	5325,40	4513,40	4748,10	4664,80	4761,50	4370,20	4972,6	382,4	7,7
		Δvalor	284,50	444,30	493,20	230,20	352,80	459,20	224,50	307,80	211,10	602,40			
6	30	Valor	5680,80	5635,50	5775,00	5776,30	5658,20	4843,00	5155,90	4897,70	5060,60	4759,60	5324,3	396,6	7,4
		Δvalor	356,54	311,24	450,74	452,04	333,94	481,26	168,36	426,56	263,66	564,66			

Anexo J- Resultados do módulo de rigidez e ângulo de fase para a mistura 85MBR

85MBR

Ângulo de fase															
estágio	frequência(Hz)	Viga	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	Média	Desv.Pad	CV
1	1	Valor	24,90	25,00	25,10	23,80	24,60	25,80	24,70	24,70	25,10	26,30	25,0	0,6	2,6
		Δvalor	0,10	0,00	0,10	1,20	0,40	0,80	0,30	0,30	0,10	1,30			
2	3	Valor	23,70	23,60	23,10	23,00	23,10	24,30	23,60	22,60	23,50	24,70	23,5	0,6	2,5
		Δvalor	0,18	0,08	0,42	0,52	0,42	0,78	0,08	0,92	0,02	1,18			
3	5	Valor	23,00	23,00	23,00	22,70	22,70	23,70	23,10	22,30	23,10	23,90	23,1	0,4	1,9
		Δvalor	0,05	0,05	0,05	0,35	0,35	0,65	0,05	0,75	0,05	0,85			
4	10	Valor	20,40	20,50	20,70	20,60	20,80	21,10	20,60	19,80	20,70	21,80	20,7	0,5	2,3
		Δvalor	0,30	0,20	0,00	0,10	0,10	0,40	0,10	0,90	0,00	1,10			
5	20	Valor	19,80	18,10	19,40	18,20	19,90	20,00	19,20	18,80	18,70	20,30	19,2	0,7	3,8
		Δvalor	0,56	1,14	0,16	1,04	0,66	0,76	0,04	0,44	0,54	1,06			
6	30	Valor	13,70	13,40	14,90	13,90	14,10	16,00	15,00	13,90	13,50	14,80	14,3	0,8	5,5
		Δvalor	0,62	0,92	0,58	0,42	0,22	1,68	0,68	0,42	0,82	0,48			
Módulo de rigidez															
estágio	frequência(Hz)	Viga	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	Média	Desv.Pad	CV
1	1	Valor	1542,80	1602,70	1437,00	1564,30	1403,20	1447,90	1409,30	1479,20	1396,30	1233,40	1451,6	99,8	6,9
		Δvalor	91,19	151,09	14,61	112,69	48,41	3,71	42,31	27,59	55,31	218,21			
2	3	Valor	2007,70	2130,70	1903,60	2037,30	1839,60	1938,70	1884,90	1916,00	1850,50	1667,50	1917,7	119,5	6,2
		Δvalor	90,05	213,05	14,05	119,65	78,05	21,05	32,75	1,65	67,15	250,15			
3	5	Valor	2266,00	2427,00	2147,20	2253,70	2079,30	2190,50	2156,90	2175,60	2106,50	1910,40	2171,3	127,7	5,9
		Δvalor	94,69	255,69	24,11	82,39	92,01	19,19	14,41	4,29	64,81	260,91			
4	10	Valor	2671,20	2835,20	2551,40	2636,10	2458,40	2623,70	2573,20	2584,50	2484,10	2268,70	2568,7	141,1	5,5
		Δvalor	102,55	266,55	17,25	67,45	110,25	55,05	4,55	15,85	84,55	299,95			
5	20	Valor	2982,50	3265,40	2901,10	3028,20	2843,90	2981,30	2976,20	2856,90	2670,50	2615,50	2912,2	175,0	6,0
		Δvalor	70,35	353,25	11,05	116,05	68,25	69,15	64,05	55,25	241,65	296,65			
6	30	Valor	3446,00	3626,40	3333,30	3398,40	3157,40	3300,30	3342,30	3281,10	3218,20	2961,90	3306,5	167,8	5,1
		Δvalor	139,47	319,87	26,77	91,87	149,13	6,23	35,77	25,43	86,33	344,63			

Anexo K- Análise Granulométrica das MBR em estudo após incineração



Processo: Análise granulométrica das MBR após incineração

Peneiro malha (mm)	% passados MBR ISEC	% passados MBR IST
20	100	100
14	98	100
10	88	95
4	59	58
2	46	44
0,5	28	25
0,125	11	9
0,063	7	5

